

**IDENTIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE OCUPAÇÃO DO SOLO COM
IMAGENS DE SATÉLITE PARA ATUALIZAÇÃO DE INVENTÁRIOS
FLORESTAIS**

Dissertação orientada por:

Professor Doutor Mário Sílvio Rochinha de Andrade Caetano

Novembro 2012

AGRADECIMENTOS

Em especial, um grande agradecimento ao Professor Doutor Mário Caetano pela sua disponibilidade, orientação e transmissão de conhecimentos e conselhos enriquecedores para a concretização deste trabalho.

Os meus agradecimentos, igualmente, a todos os que me acompanharam na realização do presente trabalho e que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para a sua concretização.

Aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada, a quem lhes dedico esta dissertação, um profundo obrigado por todo o apoio e incentivo que me deram durante a realização do presente trabalho.

IDENTIFICAÇÃO DE ALTERAÇÕES DE OCUPAÇÃO DO SOLO COM IMAGENS DE SATÉLITE PARA ATUALIZAÇÃO DE INVENTÁRIOS FLORESTAIS

RESUMO

As florestas têm vindo a perder anualmente milhares de hectares do seu património, razão pela qual é de extrema importância acionar medidas de monitorização, não só deste ecossistema complexo, mas também, de alterações ambientais a este relacionadas. O presente trabalho, desenvolvido na ilha de São Miguel do Arquipélago dos Açores, teve como objetivo principal apresentar-se como uma ferramenta essencial para a monitorização e atualização de um Inventário Florestal. Para o desenvolvimento deste estudo foram utilizadas duas imagens de diferentes datas e capturadas por satélites distintos – SPOT 4 para 2006 e SPOT 5 para 2010. Através da aplicação do NDVI foram identificadas as alterações na vegetação e, posteriormente, foram aplicados diferentes valores de limiar para cada tipo de alteração. Para extrair as áreas de decréscimo foi utilizado um valor de limiar de 1,75 ao passo que, relativamente às áreas de crescimento, foi aplicado um valor de limiar de 1,50. Os resultados obtidos a partir desta metodologia foram generalizados para uma UMC de 4ha, verificando-se que cerca de 147ha sofreram crescimento de vegetação enquanto 85ha apresentaram decréscimo. A maioria das alterações detetadas ocorreu em espaços de Culturas agrícolas e pastagens, salientando-se apenas uma área de 7,5ha na zona da Lagoa do Fogo onde houve decréscimo de vegetação na categoria Espaços florestais (*Eucalyptus globulus*). A presente metodologia apresentou bons resultados, verificando-se que 79% das alterações foram corretamente detetadas, enquanto 21% evidenciaram erro. Assim, a metodologia apresentou-se como uma mais-valia para a deteção de alterações ocorridas no coberto florestal para centrar a atualização de Inventários Florestais apenas nessas áreas detetadas.

IDENTIFICATION OF LAND COVER CHANGES WITH SATELLITE IMAGES FOR FOREST INVENTORY UPDATE

ABSTRACT

Annually, forests have been losing thousands of hectares of their heritage, which is why it is extremely important monitoring, not only of this complex ecosystem, but also other environmental changes related to this. The present work, developed in São Miguel Island in the Azores Archipelago, aimed to present itself as an essential tool for monitoring and updating of Forest Inventory. To develop this study were used two images from different dates and captured from different satellite – SPOT 4 and SPOT 5 for 2006 and 2010, respectively. Through the application of NDVI were identified changes in vegetation and subsequently were applied different threshold values for each type of change. For extracting the areas of decrease was used a threshold value of 1,75 and for increase areas was applied a threshold value of 1,50. The results obtained from this methodology were generalized to a cartographic minimum unit of 4ha, verifying that about 147ha suffered increase vegetation and about 85ha showed decreases. Most changes were detected in areas of Agricultural crops and pastures, and just one area of 7,5ha in Lagoa do Fogo showed decrease of vegetation on the Forest category (*Eucalyptus globulus*). This approach presented good results, verifying that 79% of the changes were correctly detected, while 21% showed error. The present study demonstrated that this methodology is an advantage for the detection of changes in the forest cover, so it is possible to center the update of Forest Inventory only in the change detected areas.

PALAVRAS-CHAVE

Inventário florestal

Vegetação

Deteção remota

Deteção de alterações

Índice de Vegetação de Diferença Normalizada

Região Autónoma dos Açores

KEYWORDS

Forest inventory

Vegetation

Remote sensing

Change detection

Normalized Difference Vegetation Index

Azores Autonomous Region

ACRÓNIMOS

AVHRR – *Advanced Very High Resolution Radiometer*

Bits – *Binary digits*

CAOP – Carta Administrativa Oficial de Portugal

CNES – *Centre National d'Études Spatiales*

DAP – Diâmetro à altura do peito

DASF – Divisão de Apoio ao Sector Florestal

DCPP – Divisão de Caça, Pesca e Parques

DOS – *Dark Object Subtraction*

DRRF – Direção Regional dos Recursos Florestais

DSF – Direção de Serviços Florestais

EG – Exatidão Global

EOS – *Earth Observing System*

EP – Exatidão do Produtor

EU – Exatidão do Utilizador

GMES – *Global Monitoring for Environment and Security*

GPS – *Global Positioning System*

GRA – Governo Regional dos Açores

GS – *Gramm-Schmidt*

HRG – *High Resolution Geometrical*

HRV – *High Resolution Visible*

IFN – Inventário Florestal Nacional

IFOV – *Instantaneous Field of View*

IFRAA – Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores

IFRAM – Inventário Florestal da Região Autónoma da Madeira

IGT – Instrumentos de Gestão Territorial

IR – *Infrared*

ISODATA – *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*

IVP – Infravermelho próximo

KT – *Tasselled cap*

MDT – Modelo Digital de Terreno

MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

MSS – *Multispectral Scanner*

ND – Números Digitais

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

PCA – *Principal Components Analysis*

PEOT – Planos Especiais de Ordenamento do Território

Pixel – *Picture element*

PMOT – Planos Municipais de Ordenamento do Território

PNPOT – Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território

PROTA – Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores

RAA – Região Autónoma dos Açores

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SIG-SRAF – Sistema de Informação Geográfica - Secretaria Regional da Agricultura e Florestas

SPOT – *Système Pour l’Observation de la Terre*

SRAF – Secretaria Regional da Agricultura e Florestas

TM – *Thematic Mapper*

UE – União Europeia

UEA – Unidade espacial de análise

UMC – Unidade Mínima Cartográfica

UTM – *Universal Transverse Mercator*

V – Vermelho

WGS – *World Geodetic System*

ZPE – Zona de Proteção Especial

ÍNDICE DE TEXTO

	Pág.
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
PALAVRAS-CHAVE	vi
KEYWORDS	vi
ACRÓNIMOS.....	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Área de estudo.....	3
1.3. Enquadramento legal da área de estudo	5
1.4. Objetivos	7
1.5. Estrutura da Tese.....	8
2. Revisão de literatura.....	9
2.1. O Inventário Florestal	9
2.1.1. Introdução	9
2.1.2. O Inventário Florestal em Portugal	10
2.1.3. O Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores.....	11
2.1.4. Caraterização do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores.....	13
2.2. Detecção remota	19
2.2.1. A detecção remota e a vegetação	19
2.2.1.1 Breve introdução à detecção remota	19
2.2.1.2. Caraterização espectral da vegetação.....	20
2.2.1.3. Aplicações da detecção remota no inventário florestal.....	23
2.2.2 Detecção de alterações	25
2.2.2.1. Metodologias de detecção de alterações – considerações finais.....	38

3. Metodologia para a deteção de alterações através do método de diferenças de imagens através do <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	39
3.1 Descrição dos dados.....	40
3.1.1. Imagens de satélite	40
3.2. Pré-processamento	44
3.2.1. Correção geométrica	45
3.2.2. Correção radiométrica.....	46
3.3. Métodos.....	46
4. Resultados e discussão	51
4.1. Identificação das alterações ocorridas no Inventário Florestal da RAA	51
4.2. Discussão dos resultados obtidos	66
5. Conclusão.....	71
5.1 Perspetivas futuras	71
5.2 Considerações finais	72
Referências bibliográficas	74
Anexos	79
Anexo 1 – Dados do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores.....	79
Anexo 2 – Utilização das várias combinações dos valores de limiar.....	84

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Categorias representadas nas várias cartas do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores (IFRAA, 2007).	16
Tabela 2 – Áreas totais e respetivas percentagens das espécies dominantes do IFRAA relativamente a: área total das ilhas da RAA; área total ocupada pelas espécies dominantes do IFRAA; área total dos espaços florestais do IFRAA (IFRAA, 2007).	17
Tabela 3 – Áreas totais e respetivas percentagens das espécies dominantes do IFRAA relativamente a: área total da ilha de São Miguel; área total ocupada pelas espécies dominantes do IFRAA na ilha de São Miguel; área total dos espaços florestais do IFRAA na ilha de São Miguel (IFRAA, 2007).	18
Tabela 4 – Caraterísticas do sensor HRVIR do satélite SPOT 4 e do sensor HRG do satélite SPOT 5 (Astrium, 2012).	41
Tabela 5 – Caraterísticas do sensor VEGETATION dos satélites SPOT 4 e SPOT 5 (Astrium, 2012).	42
Tabela 6 – Caraterísticas das imagens de satélite utilizadas.	43
Tabela 7 – Valores utilizados e respetivas combinações possíveis para melhor realçar o decréscimo e o crescimento da vegetação, separadamente.	50
Tabela 8 – Categorias e respetivas percentagens correspondentes às áreas excluídas.	52
Tabela 9 – Valores obtidos através do cálculo do NDVI de 2006, de 2010 e a respetiva diferença entre esses mesmos anos.	53
Tabela 10 – Avaliação do mapa final por interpretação visual.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – Localização e distribuição do Arquipélago dos Açores.....	3
Figura 2 – Enquadramento geotectónico do arquipélago dos Açores (adaptado de Nunes <i>et al.</i> , 2006).	4
Figura 3 – Representação da área de estudo – a ilha de São Miguel.	5
Figura 4 – Representação do Uso do Solo do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores (adaptado de IFRAA, 2007).....	15
Figura 5 - Caraterísticas da resolução espectral da vegetação (adaptado de Gaussman, 1977).	22
Figura 6 – Fluxograma metodológico para a deteção de alterações ocorridas na ocupação do solo do IFRAA.	39
Figura 7 – Disposição das duas imagens de satélite relativamente à ilha de São Miguel.	43
Figura 8 – Imagem capturada pelo satélite SPOT 4 em 2006 da ilha de São Miguel, com a composição RGB123.	44
Figura 9 – Imagem capturada pelo satélite SPOT 5 em 2010 da ilha de São Miguel, com a composição RGB123.	44
Figura 10 – Diagrama explicativo da extração das áreas a excluir de modo a se obter a área de estudo.	47
Figura 11 – Áreas das categorias do IFRAA a excluir.....	47
Figura 12 – Extração das nuvens e suas sombras das imagens de satélite através do método de classificação ISODATA.	48
Figura 13 – Áreas a excluir de ambas as imagens de satélite de modo a se obter a área de estudo.	48
Figura 14 – Histograma que representa a função da probabilidade da densidade da diferença de NDVIs, onde md e mi são a média de decréscimo e de crescimento, respetivamente; sd e si são o desvio padrão de decréscimo e de crescimento, respetivamente; c corresponde ao coeficiente; L_L e L_H representam o limiar de decréscimo e de crescimento, respetivamente (adaptado de Pu <i>et al.</i> , 2008).....	49
Figura 15 – Área de estudo.	52
Figura 16 – Disposição das categorias do IFRAA na área de estudo.....	52

Figura 17 – Cálculo do NDVI para 2006.	53
Figura 18 – Cálculo do NDVI para 2010.	53
Figura 19 – Cálculo da diferença de NDVIs entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006.....	54
Figura 20 – Aplicação de um coeficiente de 1,75 para as áreas de decréscimo e de um coeficiente de 1,50 para as áreas de crescimento de vegetação.	55
Figura 21 – Pormenor da aplicação dos diferentes valores de limiar, na zona das Sete Cidades.....	55
Figura 22 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação; E – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.	57
Figura 23 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação; E – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.	58
Figura 24 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação; E – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.	59
Figura 25 – Identificação das alterações tanto de decréscimo como de crescimento de vegetação que apresentam uma área igual ou superior a 4ha.	60
Figura 26 – Alterações ocorridas no IFRAA durante o período de estudo.	61
Figura 27 – Alterações detetadas nos povoamentos florestais durante o período de estudo..	61
Figura 28 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e	

1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel. 63

Figura 29 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel vegetação no IFRAA. 64

Figura 30 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel. 65

Figura 31 – Exemplo de uma área igual ou superior a 4ha que sofreu decréscimo de vegetação. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel vegetação..... 68

Figura 32 – Exemplo de alteração detetada erradamente entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de

crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.....	69
Figura 33 – Exemplo de uma área detetada erradamente como crescimento da vegetação que corresponde a uma exploração de inertes.....	70

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As florestas são um ecossistema complexo intrínseco ao nosso planeta e essencial à vida humana. Para além de serem essenciais ao processo fotossintético, que proporciona a conversão de dióxido de carbono em oxigénio, constituem também um opulente recurso natural utilizado para os mais diversos fins. Em 2005, cerca de 30% do nosso planeta era coberto por floresta, o que equivalia aproximadamente a 4 milhões de hectares de floresta (FAO, 2005). No entanto, este ecossistema constituído por um elevado número de espécies vegetais que interagem entre si lutando pelo seu espaço e sobrevivência tem vindo a perder anualmente milhares de hectares do seu património por diversas razões, entre elas agricultura intensiva, catástrofes naturais, poluição, razões económicas, construção de infraestruturas, etc. Por estas razões, é de extrema importância acionar medidas de monitorização deste ecossistema complexo. Foi com esta finalidade que surgiu o inventário florestal.

Durante muito tempo, as florestas foram consideradas um recurso inesgotável, do qual o Homem poderia usufruir incansavelmente. No entanto, com o crescimento exponencial da população, a sustentabilidade dos recursos florestais tem sido fortemente comprometida. Por todo o mundo estas começaram a diminuir drasticamente com diversas consequências negativas. Com a diminuição da área florestal e com o aumento das indústrias, o efeito de estufa começou a fazer-se sentir por todo o planeta e com vista a evitar futuros problemas tiveram que ser tomadas medidas. O Protocolo de Quioto foi um dos exemplos destas diligências. Assim, em 1997 um conjunto de países industrializados acordou em monitorizar e controlar a emissão de gases de modo a minimizar o efeito de estufa (Gonçalves, 2005). Cada país inserido no referido Protocolo teve de encontrar as suas próprias soluções para fazer cumprir o acordado e manter a preservação florestal. A floresta começou, então, a ter um papel relevante para os diversos governos mundiais, deixando de ser vista apenas como uma fonte de rendimento económico, para passar a ser considerada como aliada à sobrevivência e bem-estar não só humano mas também das espécies animais que têm como seu habitat natural as florestas. Cada país com o objetivo de conhecer e preservar a sua floresta passou a produzir informação quanto à sua extensão, qualidade e quantidade, através de um inventário florestal, monitorizando, desta forma, não só as florestas mas também as alterações ambientais a estas relacionadas. A floresta está, desde os primeiros sinais do Homem, enraizada na cultura deste como um bem essencial para as suas necessidades básicas. Sem meios de se defender e evitar o seu desaparecimento, este recurso foi sendo

utilizado intensivamente, o que contribuiu para que o planeta deixasse de estar em equilíbrio. Neste aspeto, o Homem tem assumido essa culpa e a responsabilidade de tentar reverter o processo. Por esta razão, nos dias de hoje tem sido dada mais importância à floresta e aos seus recursos. Como sinal de que a sensibilidade humana para com o meio ambiente está a aumentar, celebrou-se em 2011 o Ano Internacional das Florestas, onde as Nações Unidas evidenciaram a importância de uma floresta sustentável. O Ano Internacional das Florestas teve com um dos principais propósitos a conexão entre as pessoas e as florestas, evidenciando os benefícios que ambos podem obter se essa interligação “simbiótica” ocorrer (UN, 2012).

A informação produzida com a deteção remota tem sido cada vez mais utilizada no estudo de ambientes naturais e seminaturais recorrendo a técnicas desde a interpretação visual até a sofisticados métodos de extração de informação a partir de avançadas análises dos dados e algoritmos estatísticos. Nos dias de hoje, a interligação entre dados tradicionais e a deteção remota é extremamente recomendada (Kohl, 2006).

Nas últimas décadas, a tecnologia e os métodos utilizados em deteção remota têm evoluído significativamente. Esta ciência apresenta um vasto rol de aplicações, sendo de salientar a sua utilização em estudos de vegetação. Os trabalhos executados no âmbito da gestão de florestas utilizam desde pequenas áreas até vários hectares de floresta. Neste campo de ação as fotografias aéreas são um importante recurso, no entanto, a sua produção para grandes áreas implica elevados custos pecuniários. Por vezes é necessário a realização destas tarefas em diferentes períodos, o que faz com que a utilização destas técnicas seja reduzida apenas ao essencial. Devido a estas limitações, as imagens de satélite são mais recomendadas e utilizadas pois conseguem ultrapassar muitos desses obstáculos.

A evolução dos sensores tem permitido produzir um enorme leque de informação pertinente à tomada de decisões e organização do ordenamento florestal. Através da deteção remota é possível identificar os diferentes tipos de uso do solo/coberto do solo e criar um histórico de determinado local ao mesmo tempo que essa informação pode ser utilizada para estudos de identificação de alterações que ocorrem no coberto florestal (Kohl, 2006).

Através do presente trabalho pretende-se a elaboração de uma metodologia que englobe a utilização de imagens de satélite de dois espaços temporais distintos e a identificação de possíveis alterações ocorridas na vegetação, de modo a ser possível a atualização do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores (IFRAA).

1.2. Área de estudo

O planeta em que habitamos apresenta uma localização excecional no Sistema Solar e foi devido a essa localização e a um conjunto de acontecimentos complexos que foram criadas condições extraordinárias na Terra de forma a esta evoluir para o que ela é nos dias de hoje. Durante milhões de anos, a Terra sofreu diversas transformações até se estabelecer um equilíbrio que favoreceu o aparecimento de vida. Durante este processo evolutivo formaram-se oceanos e continentes que ainda hoje se encontram em constante alteração. Durante todo este processo evolutivo é de destacar o lugar importante que as plantas tiveram.

Localizado no Hemisfério Norte, no oceano Atlântico entre as coordenadas 37,0 – 40,0 N / 25,0 – 32,0 O, o Arquipélago dos Açores distingue-se pelas suas nove ilhas distribuídas por três grandes grupos (Figura 1):

- Grupo Oriental: São Miguel e Santa Maria;
- Grupo Central: Terceira, Faial, São Jorge, Pico e Graciosa;
- Grupo Ocidental: Flores e Corvo.

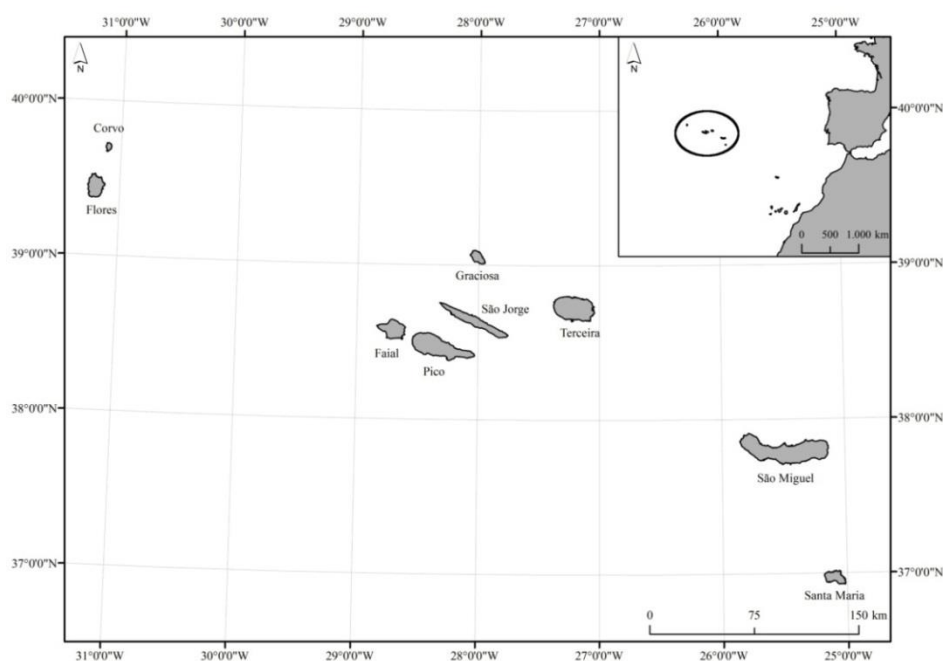


Figura 1 – Localização e distribuição do Arquipélago dos Açores.

Caraterizadas por serem de origem vulcânica, as ilhas dos Açores apresentam idades compreendidas entre 8,12 milhões de anos (Abdel-Monem *et al.*, 1975) e aproximadamente 300.000 anos (Chovelon, 1982), sendo a ilha de Santa Maria a mais antiga e o Pico a mais

recente. Este conjunto de ilhas localiza-se aproximadamente a 1600 km a Oeste de Portugal continental e a 1900 km a Este do Norte da América, estendendo-se ao longo de 500 km orientados aproximadamente de Noroeste para Sudeste. O Arquipélago dos Açores está situado na convergência de três placas litosféricas (Norte Americana, Euroasiática e Africana) originando a Microplaca dos Açores. Através desta localização é possível a verificação de diversas falhas que derivam da convergência das referidas placas e que, por sua vez, deram origem às ilhas dos Açores (Figura 2). É, também, devido a estas características geológicas que existe atividade sísmo-vulcânica ativa nos Açores (Martins, 2010).

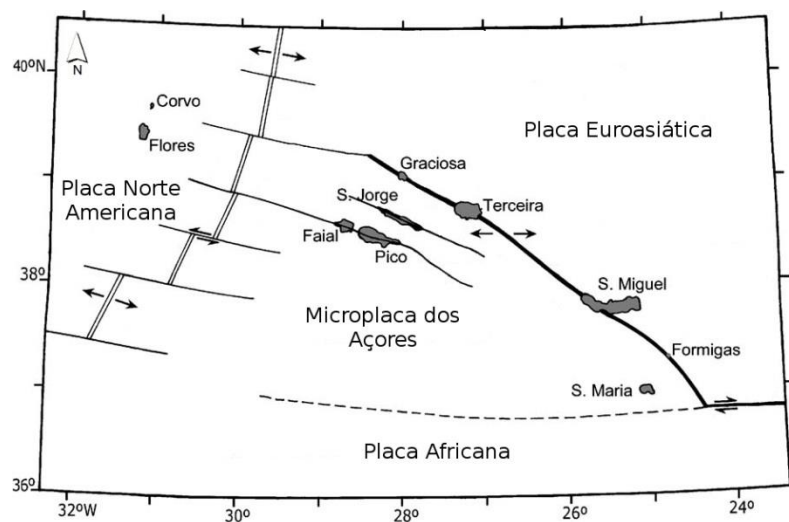


Figura 2 – Enquadramento geotectónico do arquipélago dos Açores (adaptado de Nunes *et al.*, 2006).

A distância que separa os Açores do continente Europeu e Americano faz deste arquipélago um lugar com propriedades ímpares. Caracterizado por ser um local isolado e de acesso condicionado, a colonização da vegetação foi um processo muito demorado e limitado. Assim, e tendo o oceano Atlântico como barreira geográfica, existem várias hipóteses sobre como poderá ter ocorrido esta colonização. Um aspeto a favor destas ilhas é a sua origem vulcânica, ou seja, os seus solos são muito férteis o que é favorável para a germinação da vegetação.

O presente trabalho centra-se na ilha de São Miguel (Figura 3). Com uma área de 74.457ha, orientada de Este para Oeste e de clima temperado, é a maior ilha do arquipélago dos Açores. São Miguel foi formada a partir de diferentes complexos vulcânicos e apresenta diferentes idades. A parte mais antiga localiza-se nos concelhos do Nordeste e da Povoação (cerca de 4 Ma) e estende-se para Oeste, passando pelo complexo vulcânico da Lagoa do

Fogo no centro da ilha (concelhos de Ribeira Grande, Lagoa e Vila Franca do Campo), até ao concelho de Ponta Delgada que apresenta aproximadamente 31.000 anos e onde se localiza o vulcão das Sete Cidades (CVARG, 2012).

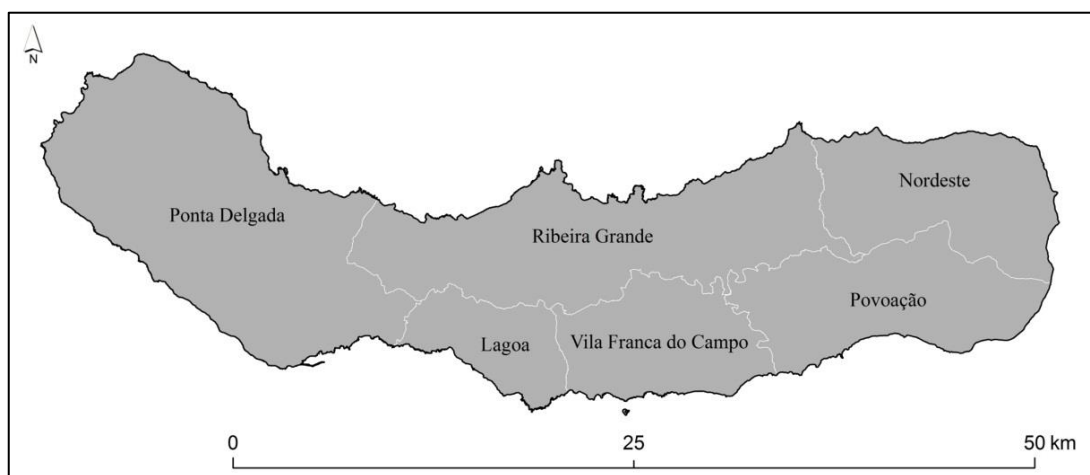


Figura 3 – Representação da área de estudo – a ilha de São Miguel.

1.3. Enquadramento legal da área de estudo

O Arquipélago dos Açores tem assistido a um crescimento da população como é possível verificar pelos dados obtidos nos censos realizados entre 2001 (241.763 habitantes) e 2011 (246.746 habitantes) (INE, 2011). Paralelamente a este incremento populacional aumenta também a preocupação para com o ordenamento do território, com particular relevância as áreas florestais. A área de estudo em análise apresenta-se inserida num conjunto de Instrumentos de Gestão Territorial (IGT) que regem os diversos usos do solo e que definem o planeamento e ordenamento do território.

Através do Decreto Legislativo Regional n.º 26/2010/A, de 30 de março, foi aprovado o Plano Regional de Ordenamento do Território dos Açores (PROTA). Este plano abrangente tem como metas principais “ (...) por um lado, traduzir em termos espaciais os grandes objetivos de desenvolvimento económico e social sustentáveis formulados para o arquipélago e, por outro, estabelecer as medidas de articulação, a nível regional, das políticas estabelecidas no Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT) e nos planos sectoriais preexistentes ou em elaboração, bem como das políticas e medidas de relevância regional contidas nos Planos Especiais de Ordenamento do Território (PEOT) e nos Planos Municipais de Ordenamento do Território (PMOT), culminando no objetivo de servir de quadro de referência para a elaboração de planos especiais, intermunicipais e

municipais de ordenamento do território.” (Decreto Legislativo Regional n.º 26/2010/A, de 30 de março). A referência a estes planos especiais e municipais é importante pois neles estão incluídas áreas relativas ao coberto florestal, nomeadamente de proteção e produção florestal.

Como se pode verificar, a área florestal da ilha de São Miguel está presente em diversos instrumentos de gestão, o que significa que o coberto florestal é tido em conta aquando do uso do solo e do ordenamento do território. O organismo do Governo Regional dos Açores (GRA) que tem poder decisivo sobre a área florestal é a Secretaria Regional da Agricultura e Florestas (SRAF). Segundo o Decreto Regulamentar Regional n.º 1/2006/A, de 10 de janeiro, que aprova a orgânica da SRAF, esta tem como atribuições:

- A definição da política regional nos domínios agrícola, pecuário e florestal, promovendo e coordenando as ações necessárias à sua execução;
- A gestão e conservação dos recursos florestais e cinegéticos, bem como dos terrenos baldios e das reservas florestais de recreio, com exceção daquelas que estejam classificadas como reservas florestais naturais;
- O apoio às atividades económicas relacionadas com a produção, industrialização, transformação e comercialização no âmbito dos sectores agrícola, pecuário e florestal.

Para execução dos mencionados objetivos, segundo o Decreto Regulamentar Regional n.º 1/2006/A, de 10 de janeiro, na referida secretaria existem diversos departamentos, nomeadamente a Direção Regional dos Recursos Florestais (DRRF), onde está presente a Direção de Serviços Florestais (DSF). Esta direção de serviços tem como objetivos a orientação, coordenação e acompanhamento da execução da política florestal nas diversas ilhas, bem como a atividade de guarda-florestal. Para além disso, a DSF divide-se na Divisão de Caça, Pesca e Parques (DCPP) e na Divisão de Apoio ao Sector Florestal (DASF). É na DASF que se encontram as principais competências relacionadas com a floresta. Assim, através do artigo 30º do Decreto Regulamentar Regional n.º 1/2006/A, de 10 de janeiro, compete à DASF cumprir os seguintes pontos:

- Efetuar e assegurar o estudo e a elaboração dos projetos de ordenamento e de exploração florestal, quer nas áreas do sector público quer nas do sector privado;
- Proceder à realização do inventário florestal regional e mantê-lo atualizado;
- Promover a execução dos trabalhos de cartografia florestal, de levantamentos topográficos e outros que se mostrem necessários;

- Planear e executar, em colaboração com os diversos serviços da DRRF, um adequado programa de sinalização de propriedades, caminhos, parques, viveiros e outras estruturas;
- Organizar e apoiar todas as atividades relacionadas com a aplicação da legislação e regulamentação relativas à proteção de arvoredos, nomeadamente quanto aos condicionamentos de cortes, de transformação de cultura e rearborização das áreas exploradas;
- Coordenar os serviços relacionados com a produção e distribuição de plantas;
- Promover, coordenar e apoiar o fomento florestal nas áreas do sector privado, nomeadamente através da aplicação de medidas de apoio financeiro, linhas de crédito e assistência técnica.

Importa, também, referir que segundo o número 1 do artigo 4º do Decreto Legislativo Regional n.º 6/1998/A de 13 de abril, a prática das ações ocorridas no revestimento florestal necessita de autorização da Secretaria Regional da Agricultura, Pescas e Ambiente, atual SRAF, que fornece uma licença através da DRRF. Segundo o artigo 2º do referido Decreto Legislativo Regional essas ações referem-se a:

- Corte, arranque, transplante, destruição ou danificação de árvores ou formações arbóreas que apresentem especial interesse económico, botânico, paisagístico ou ambiental;
- Arroteamento de terrenos incultos tendo em vista o aproveitamento para pastagens ou destinados a outros fins agrícolas;
- Transformação de terrenos florestais em terrenos para quaisquer outros fins;
- Introdução de espécies florestais inexistentes na Região;
- Fabrico de carvão vegetal, quer em terrenos incultos quer em terrenos florestais;
- Extração de leivas em terrenos incultos ou florestais.

1.4. Objetivos

O coberto florestal encontra-se em constante alteração e a monitorização e gestão dessas alterações são de grande importância para que a utilização dos recursos florestais seja feita de modo sustentável. O uso da deteção remota como auxílio na construção de um inventário florestal tem vindo a demonstrar grande utilidade para a produção de cartografia automática a escalas regional, local, nacional e até global. Ao mesmo tempo, a deteção remota também tem tido um importante papel na deteção de alterações ocorridas na vegetação. Assim, para além de um estudo aprofundado sobre o IFRAA, irá ser desenvolvida uma metodologia que

permita a atualização deste através de imagens de satélite em períodos relativamente mais curtos do que os aplicados nos atuais inventários florestais. São Miguel é a ilha mais populosa dos Açores sendo nesta que existe uma maior utilização dos recursos florestais, e onde alterações na ocupação do solo do IFRAA poderão ser mais evidentes. Por esta razão, é importante a criação de uma metodologia eficaz que alie a facilidade de utilização a resultados positivos, ou seja, que permita facilmente a identificação de alterações na ocupação do solo no IFRAA. A identificação destas variações facilita a centralização de trabalhos de campo apenas para áreas onde essas variações ocorrem ao mesmo tempo que reduz os encargos para as entidades responsáveis, resultando na atualização do IFRAA de modo eficiente. A produção de dados sobre as alterações ocorridas no coberto florestal não só permite a utilização de informação mais próxima da realidade como também é uma ferramenta importante para controlo e fiscalização da floresta.

1.5. Estrutura da Tese

O desenvolvimento do presente estudo guiou-se pelas seguintes fases:

- No Capítulo 1 é introduzido o tema da dissertação através de um enquadramento da área de estudo, do seu enquadramento legal e são definidos os objetivos do estudo;
- O Capítulo 2 é dividido em dois grandes subcapítulos onde se realiza uma revisão de literatura. Assim, no subcapítulo 2.1 são caracterizados o Inventário Florestal Nacional e o Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores, através do enquadramento histórico de ambos e caracterização deste último. No subcapítulo 2.2 é demonstrada a importância da utilização da deteção remota em estudos sobre a vegetação e são descritas diversas metodologias existentes para a deteção de alterações utilizadas em deteção remota;
- No Capítulo 3 é desenvolvida a metodologia utilizada para a identificação de alterações no Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores na ilha de São Miguel;
- No Capítulo 4 os resultados obtidos são expostos e analisados através de uma comparação multi-temporal e são identificadas as alterações ocorridas no coberto florestal;
- Por fim, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões repartidas em perspetivas futuras e considerações finais.

2. Revisão de literatura

2.1. O Inventário Florestal

2.1.1. Introdução

A floresta é um ecossistema vivo e está em constante alteração. Para entender essas alterações é necessário a existência de dados essenciais à compreensão de como determinada floresta evolui. O inventário florestal é um sistema que permite a obtenção desses dados. Através dele é possível a medição da extensão, quantidade e condições das florestas. Os inventários florestais são, assim, um meio de obtenção de informação sobre a qualidade e quantidade dos recursos florestais, centrando-se na aquisição das médias e os totais das características da floresta de determinado local. Estas características incluem o volume do *stock*, a área de um determinado tipo de floresta e medidas relativas à biodiversidade (parâmetros dendrométricos) (Gadow *et al.*, 2006). A partir dos dados adquiridos dos inventários florestais, torna-se possível a monitorização do coberto florestal de uma forma sustentável, garantindo a estabilidade florestal e a satisfação das exigências de uma sociedade em evolução (Ribeiro, 2007).

A elaboração de um inventário florestal pressupõe, em princípio, um censo completo, ou seja, a inventariação de todas as árvores de uma floresta. No entanto, este é um estudo bastante moroso e dispendioso, pois as florestas ocupam vastas áreas. Como tal, a obtenção de informação para a realização de um inventário florestal tem sido baseada em amostras de parcelas no terreno. Desta forma, apenas uma porção da floresta necessita de ser inventariada, inferindo-se estas medidas para a restante parte da floresta. Para a medição destes valores desenvolveram-se várias técnicas relacionadas com a forma de amostragem. Por um lado as parcelas a amostrar podem ser criadas aleatoriamente, por outro lado, existem modelos para a criação das áreas a amostrar. No entanto, a elaboração de um inventário florestal é um processo bem mais complexo. Para a obtenção das medições é necessária a aplicação de metodologias complexas que estão dependentes do tipo de escala do inventário florestal (local, regional, nacional ou global). Os objetivos do inventário florestal também podem variar desde a medição de *stock* até fins políticos, como acordos internacionais sobre as ações relativas à biodiversidade ou ao aquecimento global (Gadow *et al.*, 2006).

As modificações ocorridas no coberto florestal alteram os dados previamente existentes tornando o seu uso erróneo. Por esta razão, a existência de um inventário florestal com a informação atualizada é de elevada importância para proporcionar dados fiáveis que

auxiliem os gestores a decidir de forma mais correta e a avaliar as consequências dessas decisões no futuro.

2.1.2. O Inventário Florestal em Portugal

A criação do Inventário Florestal Nacional (IFN) é uma tarefa complexa mas importante. É através da sua existência que Portugal consegue monitorizar e gerir o seu coberto florestal. Este conhecimento é de extrema importância para Portugal como membro da União Europeia (UE), dando um contributo para a sua integração nos mercados económicos e, consequentemente, para o seu desenvolvimento. Após a sua realização, a tarefa que se segue é a sua atualização periódica, pois como a natureza não é estática, os dados do inventário estão em constante alteração.

Nos últimos 100.000 anos a vegetação florestal da Península Ibérica adquiriu a fisionomia que a caracteriza atualmente. Durante este período, a floresta de Portugal tem vindo a seguir um padrão existente por todo o Mediterrâneo, onde um enorme número de incêndios tem dado origem a terrenos para pastorícia, cultura de cereais e a utilização de material lenhoso para combustível e construção. No reinado de D. Dinis (entre 1279 e 1365), foi ordenada plantar uma enorme extensão florestal de pinheiro bravo na localidade de Leiria – a Mata Nacional de Leiria. D. Dinis ficou, também, conhecido por estabelecer as primeiras normas do seu ordenamento e gestão. Com o rei D. Fernando, esta mata foi a principal fonte de abastecimento de madeira para a construção naval. Devido a este intenso uso do coberto florestal começaram a surgir diversas leis nos finais do séc. XV, já com o objetivo de utilizar os recursos florestais de uma forma sustentável e ordenada. Igualmente, desde cedo que a questão do ordenamento florestal, e a utilização dos seus recursos, tem sido estudada e caracterizada. Em 1824 foi criada a Administração-Geral das Matas com o objetivo de administrar as florestas públicas que, na época, ocupavam um total de 14.464ha. Em 1876, foi elaborada uma Carta que descrevia a distribuição do coberto florestal de Portugal continental. Nesta Carta considerava-se que a floresta de Portugal continental era constituída por várias espécies de carvalhos e pinheiros, pelo castanheiro, zambujeiro e alfarrobeira. Nos anos seguintes foram realizados alguns trabalhos na área mas devido à existência de muita informação diferente, considera-se que a Carta Agrícola e Florestal de 1910 é a primeira e única fonte de informação em que as áreas agrícolas, florestais e incultas de Portugal continental foram efetivamente medidas. Através desta carta, identifica-se que as maiores concentrações florestais localizavam-se nos distritos de Lisboa, Santarém, Aveiro e Leiria e as menores nos distritos de Coimbra, Beja, Évora e Portalegre (Ribeiro, 2007).

Em Portugal, o inventário florestal está dividido em três grandes regiões devido à distribuição geográfica do país: Portugal continental (IFN), Região Autónoma dos Açores (Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores – IFRAA) e Região Autónoma da Madeira (RAM) (Inventário Florestal da Região Autónoma da Madeira – IFRAM). É em Portugal continental que têm sido realizados mais trabalhos nesta área. No presente, está em vigor o Relatório Final do 5º Inventário Florestal elaborado entre 2004 e 2006, sendo este a quinta versão do IFN (IFN, 2010). Na RAA, o inventário florestal em vigor foi realizado em 2007 e corresponde à primeira versão do IFRAA (IFRAA, 2007) enquanto na RAM foi em 2008, sendo igualmente a primeira versão do IFRAM (IFRAM, 2008).

2.1.3. O Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores

Como já se referiu, os Açores têm uma localização quase isolada no meio do oceano Atlântico. Este fato é muito importante quando se pretende estudar a vegetação aí existente. Em primeiro lugar, é necessário entender como esta chegou aos Açores. Dias (2001) realizou um estudo aprofundado onde expôs várias hipóteses relativas a este ponto. O oceano Atlântico funciona como uma enorme barreira natural que evita que a vegetação chegue facilmente aos Açores. No entanto, não foi por esta razão que se tornou numa região inóspita. Assim, outros mecanismos naturais funcionaram como transporte de sementes para estas ilhas. Destes mecanismos naturais destacam-se os seguintes (Dias, 2001):

- As aves são consideradas como um elemento transportador primário da flora vascular e o vento de diásporos do tipo esporos;
- Transporte de diásporos por icebergs;
- Algumas espécies podem, ainda, ter chegado aos Açores através de “jangadas” no curso de tempestades.

Estes mecanismos trabalharam em conjunto desde a formação dos Açores, resultando em ilhas verdejantes. Quando foram descobertos, os exploradores caracterizavam as ilhas como terras rochosas de grandes altitudes e baixos vales, cobertas de muito espessa vegetação, maioritariamente cedros, louros, gingas e faias (Dias, 2001). É de salientar que os navegadores, primeiramente, povoaram as ilhas com animais. Este dado histórico é importante porque, por um lado, demonstra a existência de vegetação nos Açores, mas por outro lado, marca o ponto de início da atividade antropogénica neste arquipélago. Mais tarde, Frutuoso (1995) descrevia a paisagem açoriana como verdadeiras florestas “...porque eram tão bastas as árvores que em muitas partes um cão não podia passar por entre elas, nem por debaixo delas; e muitas vezes se andava grande espaço de terra, sem porem os homens os pés

no chão, senão por cima das árvores, que estavam verdes, deitadas e alastradas umas por cima das outras; não porque os ventos as tivessem derribadas, senão por se tecerem os ramos de través uns com os outros, com que ficavam liados e cobriam toda a terra, pelo que não havia caminho senão por cima delas, e alguns bois se perdiam e andavam a serra três e quatro anos”.

Atualmente, esta vegetação natural denomina-se de Laurissilva e refere-se a florestas de laurifólias que estão presentes em zonas com humidade superior a 80%. Estas florestas são, também, caracterizadas pela sua riqueza em biodiversidade, onde existem espécies nativas e espécies endémicas (SPEA, 2010). É de referir que atualmente a Laurissilva não se restringe apenas ao Arquipélago dos Açores, mas também pela restante Macaronésia, nomeadamente Arquipélago da Madeira, das Canárias e de Cabo Verde. Esta dispersão geográfica pela Macaronésia é, também, um elemento importante para entender as origens da vegetação dos Açores, verificando-se que esta se diferencia da existente em Portugal continental.

No entanto, o crescimento da população nas ilhas açorianas resultou no decréscimo da vegetação natural e, consequentemente, da fauna a ela associada. Com a presença humana foram introduzidas espécies para a alimentação, produção florestal, flora ornamental e assistiu-se à conversão de floresta em terrenos para pastagens e agricultura. Exemplo desta intensa conversão de terrenos é a contribuição dada pelos Açores de cerca de 30% da produção total de leite em Portugal, o que demonstra as grandes áreas ocupadas pelas pastagens na Região (Amorim *et al.*, s.d.).

Atualmente, as espécies infestantes ocupam cada vez mais terreno que anteriormente era ocupado pela Laurissilva, o que dificulta em grande escala a preservação deste tipo de floresta dos Açores. Uma espécie é considerada infestante quando interfere na conservação da biodiversidade e dos ecossistemas naturais causando impactos ecológicos negativos nas espécies nativas de flora e fauna, nas águas e nos solos (SIARAM, 2012). Este problema reflete-se, maioritariamente, na ilha mais habitada, São Miguel. Estas preocupações foram o berço da criação do Projeto LIFE+ Laurissilva Sustentável, na área da Zona de Proteção Especial (ZPE) Pico da Vara/Ribeira do Guilherme, pois é uma zona muito importante com grandes áreas de vegetação nativa dos Açores. O objetivo principal deste projeto consiste em “...conservar os habitats prioritários, a floresta da Laurissilva e as Turfeiras, definindo as medidas mais adequadas para a sua restauração ecológica e valorizá-los para garantir a sua sustentabilidade a longo prazo” (SPEA, 2010). Como exemplo da importância desta floresta é a presença do *Pyrrhula murina*, ave endémica dos Açores que apenas se encontra distribuída na ZPE Pico da Vara/Ribeira do Guilherme na ilha de São Miguel.

Com já se verificou, estes aspetos são de elevada importância quando se defende uma visão naturalista. Sendo as ilhas habitadas pelo Homem, outros aspetos relacionados com a flora tornam-se também importantes. A floresta apresenta diversos tipos de recursos que não podem deixar de se ter em conta. Se por um lado, a floresta é convertida em terrenos de cultivo e de pastagem, por outro é transformada em espécies adaptadas para a produção de madeira, papel, entre outros fins. Este panorama leva à extrema necessidade de existir um instrumento de gestão e ordenamento do coberto florestal para a obtenção de uma floresta sustentável e equilibrada, tornando possível a existência de áreas de proteção e de áreas reservadas para a produção florestal. O IFRAA apresenta-se como uma ferramenta fundamental que engloba todos estes aspetos.

2.1.4. Caracterização do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores

De modo a fazer face a essa necessidade de atualização da informação disponível sobre as áreas florestais foi criado em 2007 pela SRAF, o Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores cujo principal objetivo centrava-se na obtenção de informação gráfica e numérica sobre a ocupação do solo bem como a avaliação das existências de material lenhoso. Toda a informação recolhida foi posteriormente integrada num Sistema de Informação Geográfica (SIG), denominado SIG-SRAF, de modo a possibilitar o cruzamento da informação proveniente das diversas áreas de intervenção da DRRF. O IFRAA torna-se, portanto, numa ferramenta essencial não só no âmbito da caracterização do espaço florestal e das espécies existentes, mas também do ordenamento do território e planeamento florestal (IFRAA, 2007).

A construção do IFRAA pressupôs duas fases distintas. A primeira destinou-se à recolha de informação cartográfica e numérica acerca da ocupação do solo com o intuito de criar um modelo de estratificação das diferentes espécies florestais e a sua distribuição por povoamentos, tendo em conta a composição e o estado de desenvolvimento. A segunda fase visou a determinação das variáveis dendrométricas dos povoamentos, permitindo a quantificação do material lenhoso e a apreciação da capacidade produtiva dos povoamentos. Na primeira fase, para elaboração da cartografia, foi definido um modelo de estratificação dos povoamentos, constituindo a legenda da Carta Florestal. Nesta fase foi fundamental a utilização do *Global Positioning System* (GPS) e a carta militar 1:25.000. De seguida, no SIG procedeu-se à vectorização das áreas identificadas no campo sobre ortofotomapas. Já na segunda fase e relativamente à amostragem de povoamentos, foram apenas medidos os estratos com mais interesse do ponto de vista da produção de material lenhoso, tendo-se instalado 141 parcelas distribuídas por todas as ilhas. Para isso foi utilizado o medidor de

distâncias *Vertex* e procedeu-se à medição do diâmetro de todas as árvores. Estas foram selecionadas através do método *Draut*, tendo em consideração características como a altura total, a altura da base da copa, o diâmetro basal, a idade, o acréscimo em raio nos últimos 5 anos e a espessura da casca. Posteriormente, esta informação foi incorporada no SIG-SRAF e foi criada uma base de dados para o armazenamento de toda a informação. Desta forma, cada povoamento tem associada informação relativa à sua área e composição. Através das parcelas amostradas, inferiu-se ainda para cada mancha o valor das diversas variáveis dendrométricas, o que permitiu em termos globais uma avaliação da existência em material lenhoso (IFRAA, 2007).

Após a realização dos trabalhos de campo e o tratamento dos dados em SIG, a DRRF apresentou os resultados do IFRAA em dois níveis de informação. Num primeiro nível, mais superficial, os dados foram organizados de forma a constituir uma Carta de Uso do Solo do IFRAA (Figura 4). Através desta representação cartográfica, rapidamente se verifica que as maiores concentrações de vegetação estão associadas aos complexos montanhosos da ilha. Os Espaços florestais encontram-se predominantemente na zona montanhosa do Nordeste e Povoação e nos complexos vulcânicos da Lagoa do Fogo e das Sete Cidades. As Áreas naturais e semi-naturais apresentam uma distribuição semelhante, sendo as manchas mais importantes as existentes na Serra da Tronqueira (onde se insere a ZPE Pico da Vara/Ribeira do Guilherme) e na Lagoa do Fogo. Associados aos Espaços florestais estão os espaços Incultos, com maior representação nas Sete Cidades e com algumas manchas, de menor tamanho, na montanha da Lagoa do Fogo e no Nordeste. Os espaços Improdutivos encontram-se na sua maioria ao longo da extensão costeira, com algumas áreas pontuais no interior da ilha e perto dos Agregados urbanos. Salienta-se, ainda, a enorme área ocupada pelas Culturas agrícolas ou pastagens ao longo da área de estudo, caracterizada por apresentar um relevo menos acentuado.

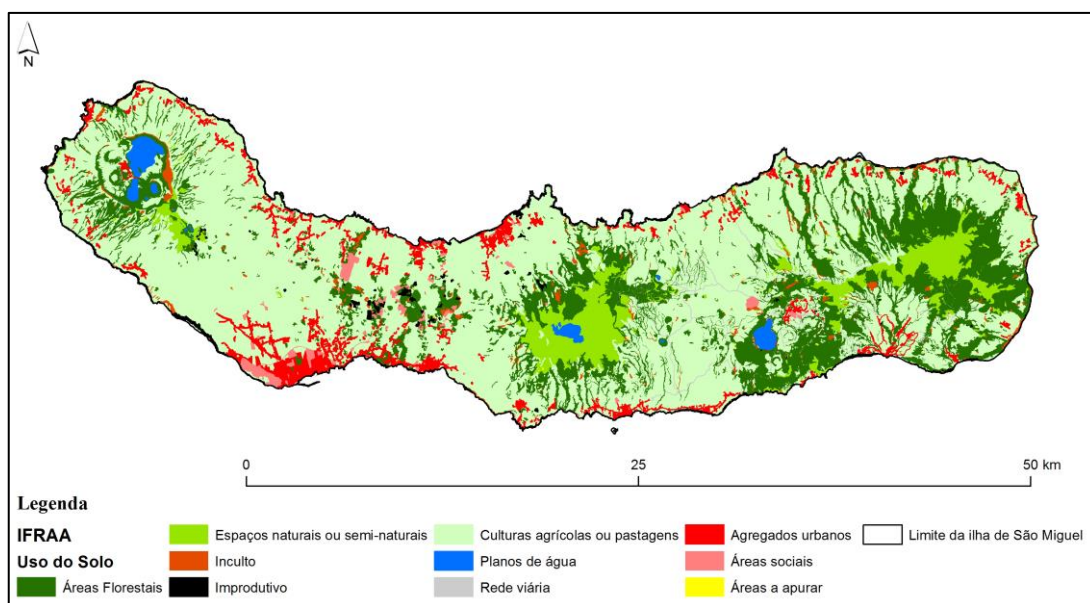


Figura 4 – Representação do Uso do Solo do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores (adaptado de IFRAA, 2007).

Com o objetivo de retratar o coberto florestal com mais pormenor, num segundo nível foram elaboradas cartas do IFRAA com informação sobre os povoamentos das espécies dominantes por domínio do uso do solo (Figura 1 do Anexo 1), os povoamentos florestais por espécie dominante e por tipo (povoamento puro ou misto) (Figura 2 do Anexo 1) e os principais povoamentos florestais de produção (Figura 3 do Anexo 1). Nestas representações cartográficas, os diferentes espaços foram divididos conforme a Tabela 1.

Categoria do IFRAA		Observações
Espaços florestais	Criptoméria	<i>Cryptomeria japonica</i>
	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>
	Acácia	<i>Acacia melanoxylon</i>
	Incenso	<i>Pittosporum undulatum</i>
	Pinheiro japonês	<i>Pinus thunbergii</i>
	Pinheiro bravo	<i>Pinus pinaster</i>
	Faia das ilhas	<i>Morella faya</i>
	Vinhático	<i>Persea indica</i>
	Cipreste	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>
	Folhosas diversas	Plátano <i>Acer pseudoplatanus</i>
		Carvalho <i>Quercus robur</i>
		Castanheiro <i>Castanea sativa</i>
		(entre outras)

(continua na página seguinte)

Categoria do IFRAA		Observações	
Espaços florestais	Resinosas diversas	Araucária	<i>Araucaria heterophylla</i>
		Teixo	<i>Taxus baccata</i>
		Cedro-do-mato	<i>Juniperus brevifolia</i>
		(entre outras)	
Espaços naturais ou semi-naturais		Maioritariamente flora endémica e nativa	Urze <i>Erica azorica</i>
			Loureiro <i>Laurus azorica</i>
			Sanguinho <i>Frangula azorica</i>
			(entre outras)
Vegetação natural		Maioritariamente flora endémica e nativa	Urze <i>Erica azorica</i>
			Loureiro <i>Laurus azorica</i>
			Sanguinho <i>Frangula azorica</i>
			(entre outras)
Incultos		Áreas de vegetação arbustiva e sub-arbustiva de espécies invasoras	Conteira <i>Hedychium gardneranum</i>
			Gigante <i>Gunnera tinctoria</i>
			Hortênsia <i>Hydrangea macrophylla</i>
			(entre outras)
Improdutivo		Desde áreas costeiras de vegetação invasora até exploração de inertes	Cana <i>Arundo donax</i>
			Piteira <i>Agave americana</i>
			Silva-brava <i>Rubus ulmifolius</i>
			(entre outros)
Culturas agrícolas ou pastagens		Áreas de carácter agrícola e de pastagem	
Planos de água		Planos de água (por exemplo, lagoas)	
Rede viária		Rede viária (por exemplo, estradas)	
Agregados urbanos		Áreas com carácter urbano	
Áreas sociais		Áreas com carácter urbano	
Áreas a apurar		Áreas cujo coberto do solo/uso do solo não foram identificadas aquando da realização do IFRAA	

Tabela 1 – Categorias representadas nas várias cartas do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores (IFRAA, 2007).

Com os dados obtidos, foram elaboradas diferentes representações cartográficas segundo os povoamentos florestais por espécie dominante e por domínio de uso florestal, por espécie dominante e por tipo (puro ou misto), e pelos principais povoamentos florestais de produção. Estas diferentes peças cartográficas foram produzidas para todas as ilhas da RAA (IFRAA, 2007). Como este trabalho se centra na ilha de São Miguel, de seguida, expõem-se os dados do IFRAA relativamente à RAA no geral e à ilha de São Miguel em particular. Para uma consulta mais pormenorizada, na Tabela 1 do Anexo 1 encontram-se todos os dados sobre o IFRAA. Relativamente aos principais valores médios dendrométricos e erros de amostragem

associados por estrato florestal, estes apresentam-se na Tabela 2 do Anexo 1, sendo de evidenciar que através do cálculo do erro, os valores obtidos apresentam 95% de confiança.

Cerca de 32% da área terrestre da RAA pertence ao IFRAA, o que corresponde a cerca de um terço do seu território. Através da análise da Tabela 2 é possível verificar as áreas e respetivas percentagens ocupadas por cada categoria do IFRAA nesta Região. É de notar que os Espaços florestais ocupam cerca de 21% da RAA e dentro destes as categorias que apresentam maior relevância são o Incenso com praticamente 50% de ocupação e a Criptoméria que ocupa dos 26% (IFRAA, 2007).

Categorias do IFRAA		Áreas (ha)	RAA (%)	IFRAA (%)	Espaços florestais (%)
Espaços florestais	Criptoméria	12394,8	5,3%	16,8%	25,9%
	Eucalipto	3581,8	1,5%	4,8%	7,5%
	Folhosas diversas	587,7	0,3%	0,8%	1,2%
	Acácia	4322,1	1,9%	5,8%	9,0%
	Incenso	23888,0	10,3%	32,2%	49,9%
	Pinheiro japonês	124,8	0,1%	0,2%	0,3%
	Pinheiro bravo	216,2	0,1%	0,3%	0,5%
	Resinosas diversas	106,1	0,0%	0,1%	0,2%
	Faia das ilhas	2442,0	1,1%	3,3%	5,1%
	Vinhático	161,9	0,1%	0,2%	0,3%
	<i>Camaecyparis</i>	20,8	0,0%	0,0%	0,0%
	Total dos espaços florestais	47846,2	20,6%	64,7%	100,0%
Espaços naturais e semi-naturais		22959,6	9,9%	31,0%	-
Incultos		3205,4	1,4%	4,3%	-
Área total ocupada pelas espécies dominantes do IFRAA		74011,2	31,9%	100,0%	-
Área total da RAA		232197,2	100,0%	-	-

Tabela 2 – Áreas totais e respetivas percentagens das espécies dominantes do IFRAA relativamente a: área total das ilhas da RAA; área total ocupada pelas espécies dominantes do IFRAA; área total dos espaços florestais do IFRAA (IFRAA, 2007).

O presente estudo insere-se na ilha de São Miguel. Esta apresenta uma vasta área do seu território ocupado pelo IFRAA, cerca de 30%. Seguidamente, na Tabela 3, apresentam-se as áreas e respetivas percentagens correspondentes a cada categoria relativamente à referida ilha. Importa referir que os Espaços florestais ocupam cerca de 21% desse território e as

categorias destes espaços que apresentam maior relevância na ilha de São Miguel são a Criptoméria com 51%, o Incenso com 23% e a Acácia com 18%. (IFRAA, 2007).

Categorias do IFRAA		Áreas (ha)	São Miguel (%)	IFRAA (%)	Espaços florestais (%)
Espaços florestais	Criptoméria	8123,9	10,9%	36,2%	50,9%
	Eucalipto	678,3	0,9%	3,0%	4,3%
	Folhosas diversas	233,1	0,3%	1,0%	1,5%
	Acácia	2928,6	3,9%	13,0%	18,4%
	Incenso	3701,4	5,0%	16,5%	23,2%
	Pinheiro japonês	8,1	0,0%	0,0%	0,1%
	Pinheiro bravo	2,0	0,0%	0,0%	0,0%
	Resinosas diversas	23,5	0,0%	0,1%	0,1%
	Faia das ilhas	235,8	0,3%	1,1%	1,5%
	Vinhático	1,8	0,0%	0,0%	0,0%
	<i>Camaecyparis</i>	14,7	0,0%	0,1%	0,1%
	Total dos espaços florestais	15951,2	21,4%	71,0%	100,0%
Espaços naturais e semi-naturais		4927,1	6,6%	21,9%	-
Incultos		1577,7	2,1%	7,0%	-
Área total ocupada pelas espécies dominantes do IFRAA		22456,0	30,2%	100,0%	-
Área total de São Miguel		74457,5	100,0%	-	-

Tabela 3 – Áreas totais e respetivas percentagens das espécies dominantes do IFRAA relativamente a: área total da ilha de São Miguel; área total ocupada pelas espécies dominantes do IFRAA na ilha de São Miguel; área total dos espaços florestais do IFRAA na ilha de São Miguel (IFRAA, 2007).

Estes resultados foram disponibilizados através de um webSIG (SIG-SRAF, 2007) onde é possível encontrar vários tipos de pesquisa, nomeadamente, o cruzamento das cartas florestais com os limites administrativos (para obtenção das áreas florestais por ilha, concelho ou freguesia); com os limites do perímetro florestal (para avaliação das áreas florestais públicas e privadas); ou com uma carta de declives ou altimetria (para efetuar zoneamentos que sirvam, por exemplo, de apoio a planos de exploração ou de ordenamento florestal) (IFRAA, 2007).

2.2. Detecção remota

2.2.1. A detecção remota e a vegetação

Neste capítulo pretende-se demonstrar a interligação existente entre a detecção remota e o inventário florestal. Numa primeira parte, será feita uma breve introdução a esta por imagens de satélite, seguindo-se de caracterização espectral da vegetação. Por fim, apresentam-se algumas das aplicações da detecção remota no inventário florestal.

2.2.1.1 Breve introdução à detecção remota

Segundo Lillesand e Kiefer (1994), detecção remota é descrita como a arte e a ciência de obter informação de um objeto, área ou fenómeno através da análise de dados adquiridos por um instrumento que não está em contato com o objeto, área ou fenómeno analisado. Esta informação obtida refere-se, a maior parte das vezes, à radiação eletromagnética emitida pelos objetos (Caetano, 2011). Os sensores para captar as imagens podem estar montados em aviões ou em satélites, adquirindo diferentes tipos de imagens que têm aplicabilidades distintas.

As imagens de satélite diferem consoante o tipo de instrumento que as captam. Estas variações podem ocorrer ao nível da resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica:

- Resolução espectral – dimensão e número de intervalos de comprimento de onda do espectro eletromagnético que o sensor é capaz de distinguir (Caetano, 2011). A resolução espectral envolve os seguintes parâmetros (Meneses e Almeida, 2012): (i) número de bandas que o sensor possui; (ii) largura do comprimento de onda das bandas; (iii) posição em que as bandas estão situadas no espectro eletromagnético.
- Resolução espacial – determina o tamanho do menor objeto que pode ser identificado numa imagem. Para que um objeto seja capturado por uma imagem de satélite tem de ter, no mínimo, tamanho igual ou superior ao tamanho que o sensor recebe (Meneses e Almeida, 2012). A resolução espacial depende do campo instantâneo de visão do sensor, denominado de IFOV (*Instantaneous Field of View*). Este corresponde ao cone angular de visibilidade de um sensor e determina a área de terreno que, na teoria, é observada pelo sistema posicionado a uma dada altitude e num dado instante de tempo.
- Resolução temporal – é o tempo que um satélite demora a captar imagens do mesmo local. A resolução temporal pode ser: (i) absoluta, se as imagens do mesmo local tiverem o mesmo ângulo de observação; (ii) relativa, se as imagens captadas por um

satélite do mesmo local não tiverem o mesmo ângulo de observação (Caetano, 2011);

- Resolução radiométrica – é a habilidade do sensor registrar alterações na intensidade da radiação para um dado comprimento de onda. A resolução radiométrica define o número de níveis digitais usados para exprimir os dados captados pelo sensor. A resolução radiométrica de um sensor é proporcional à sua capacidade de detecção e registo de pequenas diferenças na energia refletida. Este registo é representado por um número digital positivo, que equivale ao número de *bits* utilizados para codificar números em formato binário, sendo que cada bit grava uma potência de 2. Assim, por exemplo, um sensor que utilize 8 *bits* para gravar dados, apresenta 256 (2^8) níveis disponíveis e os números digitais (ND) variam entre 0 e 255. Noutro caso, se um sensor utilizar 4 *bits* para gravar os dados, então apenas existem 16 (2^4) níveis disponíveis, e os ND variam de 0 a 15 (Caetano, 2011).

2.2.1.2. Caracterização espectral da vegetação

Na vegetação, através do processo da fotossíntese, a energia do sol é capturada e armazenada em moléculas de glicose formadas a partir de água e dióxido de carbono provenientes da atmosfera, existindo a produção de oxigénio que se liberta para o meio ambiente. As plantas adaptaram a sua estrutura interna e externa das folhas de modo a aumentarem a sua capacidade de realizar a fotossíntese. Estas estruturas e a sua interação com a energia eletromagnética têm um impacto direto na forma como as folhas e as copas das árvores aparecem espectralmente quando gravadas por instrumentos de detecção remota. Para que a fotossíntese ocorra são necessários os seguintes elementos: (i) dióxido de carbono; (ii) água; (iii) irradiância. O dióxido de carbono é captado do ar e da água e a luz do sol fornece a irradiância. A presença destes elementos reflete uma folha saudável e por sua vez uma vegetação igualmente saudável. Assim, a energia refletida por uma planta em bom estado é diferente da energia de uma planta na ausência de um ou mais dos referidos elementos, retratando uma planta doente (Jensen, 2000).

É necessário, primeiro, conhecer como os pigmentos das folhas, a dispersão interna e o conteúdo de água nas folhas afetam as propriedades de refletância e transmitância das folhas. Estes aspetos têm influência na energia absorvida e refletida pela vegetação. Para além disso, diferentes estruturas internas das folhas interagem diretamente com diferentes comprimentos de onda (Jensen, 2000).

O processo da fotossíntese determina como a folha e a copa associada aparecem radiometricamente nas imagens de satélite. Este processo ocorre nos cloroplastos, que estão presentes nas folhas e nas partes verdes das plantas. Nos cloroplastos encontram-se vários tipos de clorofila, sendo a mais importante a clorofila *a* e *b*. São estes pigmentos os responsáveis pela absorção da maior parte da energia, mais propriamente na região do visível do espectro eletromagnético. Assim, a clorofila *a* caracteriza-se por absorver energia com comprimentos de onda entre 430 e 650nm, que corresponde a região do azul, e a clorofila *b* absorve energia entre 450 e 650nm, que corresponde à região do vermelho (Figura 5). Verifica-se, assim, que os cloroplastos absorvem o azul e o vermelho e por isso refletem o verde, sendo esta a cor que os nossos olhos conseguem ver (Jensen, 2000).

O comportamento espectral da vegetação também se caracteriza pelo aumento da refletância na região do infravermelho próximo, ou seja, entre 700 e 1200nm (Figura 5). Esta refletância ocorre pois, se as plantas absorvessem essa energia da mesma forma que o fazem na região do visível, elas poder-se-iam tornar muito quentes e as proteínas tornavam-se irreversivelmente desnaturadas. Por esta razão, as plantas adaptaram-se para que não necessitassem de utilizar essa significativa quantidade de energia do infravermelho próximo e simplesmente refletem-na ou transmitem-na para folhas subjacentes ou para o solo (Jensen, 2000).

Como é possível verificar, as plantas precisam de água para sobreviver e crescer. Esta água é absorvida pela raiz da planta e sobe para as folhas pelo caule. Quando uma planta é regada ou quando chove, tem a tendência para armazenar a maior quantidade de água de que é capaz. Caso contrário, a quantidade de água na planta diminui com o passar do tempo ficando sem água no seu interior. Este aspeto é perceptível através de imagens de satélite, no sentido em que há uma grande relação entre a refletância da energia no infravermelho médio entre 1300 e 2500nm e a quantidade de água presente numa planta, existindo dois picos de refletância aos 1600 e 2200nm (Figura 5) (Jensen, 2000).

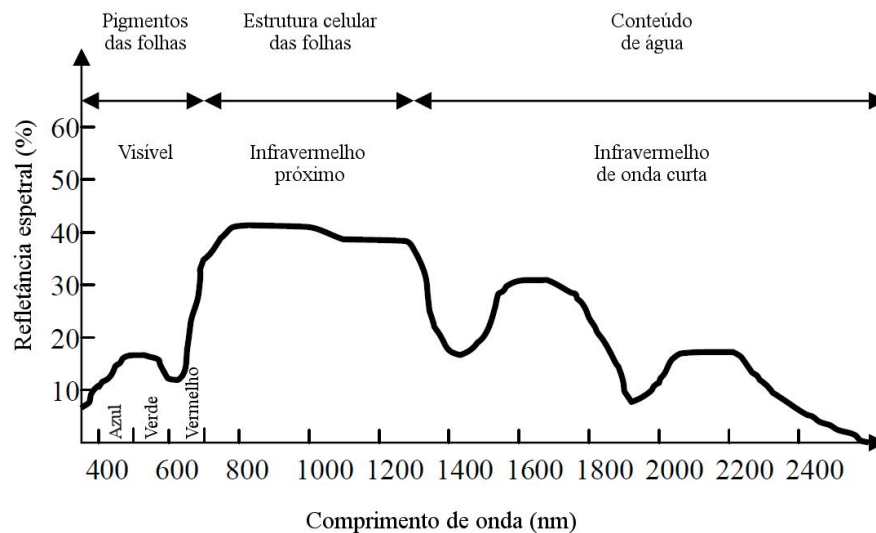


Figura 5 - Características da resolução espectral da vegetação (adaptado de Gaussman, 1977).

Um aspecto importante a realçar é que nem todas as plantas funcionam da mesma maneira. Existem diferentes espécies e cada uma possui características distintas. Para além disso, plantas da mesma espécie podem apresentar as suas propriedades alteradas devido, normalmente, a fatores externos. Sendo assim, cada espécie absorve e reflete a luz de diferente forma pois, têm características que fazem com que os passos explicados anteriormente se realizem de maneiras distintas. Isto resulta em refletâncias de comprimentos de onda distintas, o que pode facilitar a identificação de diferentes espécies de flora utilizando imagens de satélite. Porém, é possível acontecer que as plantas se encontrem doentes resultando, também, na refletância de comprimentos de onda anómalos comparativamente aos normais. Estes aspetos são, assim, relevantes para a avaliação do estado de saúde de determinada área de vegetação. As características desta vegetação variam de acordo com outro fator de elevada importância: a sazonalidade. As estações do ano ocorrem, normalmente, em períodos idênticos todos os anos. Dependendo da estação, a planta comporta-se de maneira diferente espectralmente. Por exemplo, no inverno como existe maior precipitação, a planta irá conter no seu interior maior quantidade de água do que no verão, altura do ano em que a chuva é relativamente escassa, existindo maior refletância no infravermelho próximo no inverno do que no verão. No entanto, como existe uma maior precipitação no inverno, existe igualmente a presença de muitas nuvens, o que prejudica a captação de imagens da superfície terrestre. Para além disso, existem plantas de folha caduca, que não possuem folhas no inverno, e de folha permanente, apresentando folhas durante todo o ano. Este é mais um aspeto a ter em conta quando se estuda a vegetação com imagens de satélite pois poderia ocorrer a identificação de uma área sem vegetação no inverno quando na realidade existe vegetação mas, nessa altura do ano, encontra-se sem

folhas (Jensen, 2000). Existem, ainda, outros fatores que influenciam e diferenciam as características espectrais que um sensor capta relativamente à vegetação, mais concretamente, à agricultura (Jensen, 2000):

- Culturas plantadas com um intervalo de tempo entre si (por exemplo, de 10 dias) irão apresentar coberturas menos desenvolvidas que as outras;
- Se uma cultura receber mais água do que outra irá resultar na produção de mais biomassa, existindo diferenças nas coberturas das culturas;
- Se uma cultura ficar madura mais rapidamente que outra (através de fertilizantes ou poda);
- Se uma cultura apresentar um espaçamento ou orientação muito diferente do da outra cultura;
- Se as coberturas das culturas forem muito distintas entre si.

Tendo em conta todos estes aspetos, quando se realizam estudos multi-temporais de vegetação é importante a escolha de imagens que coincidam no mesmo período do ano, ou seja, imagens anuais. Desta forma, estar-se-á a minimizar possíveis diferenças espectrais da vegetação, obtendo-se melhores resultados.

Visto que 30% do nosso planeta era coberto por floresta em 2005 (FAO, 2005), a combinação da deteção remota com a vegetação é de elevada importância. Assim, através da utilização de imagens de satélite é possível o estudo de grandes áreas de vegetação. Como se verificou, os satélites possuem diversos sensores que captam os diferentes comprimentos de onda refletidos pelos objetos na superfície da Terra e a vegetação apresenta características espectrais únicas. Desta forma, são notáveis os aspetos benéficos da aplicabilidade da deteção remota em estudos da vegetação.

2.2.1.3. Aplicações da deteção remota no inventário florestal

Tradicionalmente, os métodos de aquisição de informação para a realização de um inventário florestal à escala regional tinham por base a recolha de dados no campo e na interpretação de fotografias aéreas (Ribeiro, 2007). Quanto à escala regional, a recolha de dados no campo apresenta-se como uma tarefa muito dispendiosa tanto em termos monetários como de tempo. Assim, as fotografias aéreas e as imagens de satélite são uma fonte de informação indispensável para a cartografia dos povoamentos, sendo que a exatidão da informação fornecida difere consoante o método utilizado (Soares e Pereira, 2002).

No entanto, os dados recolhidos em trabalhos de campo continuam a ter um cariz muito importante e podem ser combinados com a informação obtida pelas fotografias aéreas ou imagens de satélite devido à calibração e validação de métodos e modelos, à interpolação espacial ou temporal da rede de observação no terreno e à assimilação em modelos ou ferramentas de simulação do funcionamento dos ecossistemas, do crescimento florestal e da previsão da produção florestal (Deshayes *et al.*, 2006). Esta combinação de informação tem de ser efetuada de forma muito meticulosa devido a fatores relacionados com a geometria das imagens, a posição das parcelas de campo, a proximidade temporal entre as medições de campo e as imagens de satélite, os pixéis mistos, as condições atmosféricas, entre outros fatores. A partir desta interligação de informação podem surgir alguns erros de cariz geométrico. Estes põem em causa a precisão na correspondência entre as imagens de satélite e as parcelas de campo, influenciando a exatidão da classificação. Outro efeito é a redução da precisão ao nível do pixel, influenciado, também, pela utilização de pequenas parcelas de campo associadas a pixéis de sensores como o Landsat TM (Ribeiro, 2007).

Em estudos sobre o coberto florestal, a deteção remota com imagens de satélite tem tido um papel determinante, destacando-se variadas utilizações (Ribeiro, 2007):

- Cartografia da distribuição do coberto florestal – estudos cartográficos são menos dispendioso que o trabalho de campo, exigem menor planificação, equipas mais reduzidas e um menor número de peritos;
- Identificação de alterações no coberto florestal provocado pela desflorestação ou arborização;
- Inventário florestal – estratificação para o desenho do inventário florestal e na estimação de parâmetros e produção de mapas e medições fiáveis de características físicas dos povoamentos florestais ou a estratificação posterior de amostragens (Nelson, 2005);
- Avaliação do estudo fitossanitário da floresta e de processos fisiológicos;
- Estudo dos incêndios florestais, cartografia de áreas ardidas e monitorização de áreas com elevado risco de incêndios;
- Apoio ao combate de incêndios florestais através de dados sobre a velocidade e direção dos ventos e o teor de humidade de áreas circundantes, que podem contribuir para a previsão da velocidade e direção de propagação das chamas;
- Ordenamento das áreas florestais urbanas;
- Avaliação e identificação de habitats.

Segundo Boyd e Danson (2005) os dados recolhidos através de imagens de satélite podem oferecer três níveis de informação: a avaliação do coberto florestal, o tipo de floresta, e as propriedades biofísicas e bioquímicas das florestas.

Nos dias de hoje, existe uma enorme variedade de satélites, cada qual com características únicas. O cenário ideal seria a possibilidade de mobilizar o satélite pretendido dependendo do tipo de estudo a efetuar e do tipo de escala desejada. Atualmente este panorama não é possível de se concretizar e, muitas vezes, as imagens pretendidas de determinada área para determinado ano, combinadas com boas condições atmosféricas, continuam a ser um entrave para a realização de alguns estudos do coberto florestal com recurso à deteção remota. No entanto, estas implicações obrigam à existência de um maior rigor na escolha do satélite pretendido, nomeadamente em relação à escala. Segundo Franklin (2001), a escala e a resolução espacial estão relacionadas:

- Imagens de baixa resolução espacial – apropriadas ao estudo de fenómenos que podem variar em centenas ou mesmo milhares de metros (pequena escala), podendo as imagens serem obtidas do sensor AVHRR;
- Imagens de média resolução espacial – adequadas ao estudo dos fenómenos que podem variar em dezenas de metros (escala média). Estas imagens podem ser obtidas a partir de sensores como o Landsat, SPOT e IRS;
- Imagens de muito grande resolução espacial – adequadas ao estudo de fenómenos que podem variar de centímetros a metros (grande escala) e as imagens podem ser adquiridas por sensores como o IKONOS.

2.2.2 Deteção de alterações

A deteção de alterações é o processo de identificação de diferenças no estado de um objeto ou fenómeno através da observação em diferentes datas. Basicamente, este envolve a habilidade de quantificar os efeitos temporais usando dados multi-temporais. Este processo é utilizado para diversas aplicações como análises de alterações do uso do solo, gestão de terrenos agrícolas, avaliação de desflorestamento, estudo de mudanças fenológicas da vegetação, mudanças sazonais na produção de pastagens, avaliação de danos, deteção de *stress* na vegetação, gestão de desastres e medições sobre o descongelamento de neve, análise das características térmicas do dia/noite e outras mudanças ambientais (Singh, 1989).

Detetar alterações pressupõe a existência de características que podem ser medidas e comparadas. Identificar mudanças num objeto ou fenómeno é um processo utilizado no dia-a-dia de forma automática pelo Homem. Sempre que analisamos algo, estamos a compará-lo

(inconsciente ou conscientemente) com uma ideia ou conceito que existe na nossa mente. Assim, se o que estamos a observar apresenta alguma diferença relativamente ao que temos por base, então o nosso cérebro rapidamente consegue distinguir e revelar essa alteração ocorrida. No entanto, nem todas as alterações são perceptíveis desta forma, pois a mente humana possui limitações.

Os ecossistemas estão num estado permanente de mudança por todo o mundo, à escala espacial e temporal. As causas que originam estas mudanças podem ser naturais, antropogénicas, ou a combinação de ambas. Para além disso, os impactos dessas alterações, por exemplo, a mudança a nível global do uso do solo, não estão uniformemente distribuídos na Terra, ou seja, pode ocorrer alteração do uso do solo em determinado local mas tal não acontecer noutra (Coppin *et al.*, 2004).

Devido ao fato de a sustentabilidade se ter tornado um objetivo principal na gestão dos ecossistemas, subsiste cada vez mais a necessidade de dados mais precisos e atualizados (Coppin *et al.*, 2004). O estudo do ecossistema no geral e as alterações que ocorrem neste são de grande importância para a comunidade devido ao seu valor económico, social e ambiental. Como acontecem diversas alterações, a monitorização dos ecossistemas é fundamental para estudos de evolução da paisagem e para ações de planeamento e ordenamento do território (Nunes, 2007).

A identificação de alterações pode ser realizada de diversas formas, dependendo do tipo de alteração que se pretende identificar. Este processo pode ser realizado apenas pela comparação visual sem a utilização de qualquer aparelho. Desta forma nem todas as alterações são detetadas e também não é possível ter qualquer registo, o que limita, igualmente, a sua deteção. Por esta razão se torna importante a existência de um registo do fenómeno ou processo que se pretende comparar. Assim, a utilização de diferentes imagens fotográficas de um determinado local pode ser suficiente mas, quando se pretende identificar modificações a escalas maiores, a utilização de imagens de satélite tem tido um lugar preferencial. Estas imagens têm diversas propriedades que as tornam excecionais para o estudo e a monitorização do uso do solo/coberto do solo. As imagens de satélite possibilitam uma fácil aquisição de dados multi-temporais a baixo custo e apresentam características espaciais e espectrais que facilitam a identificação de mudanças. Por essa razão são consideradas um suporte ideal e fundamental para estudos de processos contínuos e deteção de alterações (Nunes, 2007). Algumas das aplicações de deteção de alterações são (Lu *et al.*, 2004):

- Alterações na ocupação e uso do solo;
- Alterações na vegetação ou na floresta;
- Mortalidade, desflorestação e levantamento de prejuízos na floresta;
- Alterações nas zonas húmidas;
- Fogos florestais;
- Alterações da paisagem;
- Alterações urbanas;
- Alterações ambientais;
- Outras aplicações como a monitorização de culturas agrícolas, alterações de massas de glaciares, entre outras.

Segundo Lu *et al.* (2004) um estudo sobre deteção de alteração deverá fornecer as seguintes informações:

- A área alterada e a taxa de alteração;
- Distribuição espacial dos tipos de alterações;
- Mudança de trajetórias dos tipos de cobertura do uso do solo;
- Avaliação da exatidão dos resultados da deteção de alterações.

Para além disso, ao se realizar um estudo de deteção de alterações existem três grandes passos essenciais a realizar (Lu *et al.*, 2004):

- Pré-processamento da imagem, incluindo retificação geométrica e registo da imagem, correção radiométrica e atmosférica, e correção topográfica se a área de estudo estiver inserida numa área montanhosa;
- Seleção das técnicas adequadas para a realização da análise de deteção de alterações;
- Avaliação da exatidão.

Relativamente ao último ponto, a exatidão das alterações identificadas depende de vários fatores (Lu *et al.*, 2004):

- Precisão geométrica entre as imagens de diferentes datas;
- Calibração ou normalização entre as imagens de diferentes datas;
- Disponibilidade de dados de confiança e de qualidade que representem a realidade;
- Complexidade da paisagem e do ambiente na área de estudo;
- Métodos de deteção de alterações ou algoritmos utilizados;
- Classificação e esquemas de deteção de alterações;

- Habilidade e experiência do analista;
- Conhecimento e familiaridade da área de estudo;
- Restrições de tempo e de custos.

Todos estes aspetos são relevantes e influenciam positivamente ou negativamente a exatidão das alterações identificadas, requerendo especial atenção por parte do analista de modo a poder identificar possíveis alterações. A avaliação dos mapas é um processo essencial, pois, com este procedimento é possível perceber se o mapa que se está a interpretar é fidedigno ou não. Nos dias de hoje, a utilização de mapas é uma tarefa diária e a ocorrência de erros pode afetar toda a qualidade do trabalho em curso. Assim, a exatidão dos mapas é cada vez mais importante e os meios de os construir mais avançados, aproximando-os mais da realidade. Em estudos de detecção remota, a avaliação da exatidão dos mapas é essencial. Através desta ciência são criados mapas temáticos a partir de imagens de satélite, sendo muitas vezes utilizados métodos diferentes para classificar as imagens. Para que estes mapas possam ser utilizados com confiança, é necessário, primeiramente, efetuar a avaliação dos mesmos. Para tal, os índices mais utilizados nesta fase são (Caetano, 2011):

- Exatidão Global (EG) – avalia a proporção de unidades de amostra corretamente classificadas da totalidade da amostra usada na validação. Este índice é calculado pela divisão do número de unidades de amostra corretamente classificadas e a dimensão total da amostra. Esta avaliação quantifica, apenas, os elementos fora da diagonal que estão relacionados com erros de omissão;
- *Kappa* – a vantagem deste índice em relação à EG é que integra indiretamente todos os elementos da não diagonal, e não apenas os resultantes de erros de omissão.

Para avaliar a exatidão de identificação de cada classe, os índices mais utilizados são (Caetano, 2011):

- Exatidão do Produtor (EP) – refere-se à proporção de unidades de amostra que foram corretamente atribuídas à sua verdadeira classe. A EP é calculada pelo quociente entre o número de unidades de amostra corretamente atribuídas a uma determinada classe e o número de amostras que efetivamente pertencem a essa classe. Os resultados obtidos através deste índice são complementares aos obtidos através do cálculo do erro de omissão;
- Exatidão do Utilizador (EU) – expressa a proporção de unidades de amostra que efetivamente pertencem à classe a que foram atribuídas. A EU é calculada pelo quociente entre o número de unidades de amostra corretamente atribuídas a uma

determinada classe e o número de unidades de amostra atribuídas, corretamente ou não, a essa mesma classe. Os resultados alcançados através deste índice são complementares aos obtidos através do cálculo do erro de comissão.

Uma das etapas da avaliação dos mapas é a criação de uma matriz de erro, onde a informação é comparada a partir de dados de referência com a informação obtida no mapa, para um determinado número de áreas amostradas (Congalton e Green, 2009), obtendo-se, assim, a EG, a EP e a EU.

Como já foi referido anteriormente, a informação captada pelo sensor e que origina a imagem sofre um longo percurso. Esta informação captada refere-se aos diferentes comprimentos de onda refletidos por determinado objeto e pode ser fortemente influenciada por diversos fatores. Estes podem influenciar as imagens captadas e, por sua vez, dificultar a deteção de alterações. Ou seja, as diferenças que se podem identificar em determinado estudo multi-temporal podem estar associadas a erros ocorridos quando a imagem foi captada, em vez de existir verdadeiramente alteração no solo. Um dos problemas que acompanha a deteção remota são os erros associados ao momento da captação das imagens, sendo por isso uma prioridade desta ciência a sua diminuição. O ruído produzido afeta a capacidade de deteção de alterações de um sistema ou cria até fenómenos de alterações irreais. Existem vários motivos que podem causar tais ruídos, tais como diferenças na absorção e espalhamento atmosféricos devido a variações de vapor de água e concentrações de aerossóis na atmosfera em momentos diferentes no tempo, variações temporais no zênite solar e/ou ângulos de azimute e inconsistências da calibração dos sensores para imagens separadas. O pré-processamento é essencial e tem como objetivos principais a interligação entre os dados captados e os fenómenos biofísicos ocorridos, a remoção de erros de aquisição de dados e de ruído das imagens e a criação de máscaras para dados irrelevantes ou que contaminam as imagens (por exemplo, nuvens e corpos de água quando se efetuam estudos de deteção de alterações na vegetação). Quando se realizam estudos multi-temporais, o pré-processamento das imagens é um passo cada vez mais exigente e obrigatório do que no caso de estudos de uma única data. Esta etapa compreende, normalmente, diversas operações incluindo a calibração da radiação ou da refletância no satélite, correção atmosférica ou normalização, registo das imagens, correção geométrica, mosaico, alguns ajustes e utilização de máscaras (por exemplo, para nuvens, água ou outras características irrelevantes) (Coppin *et al.*, 2004).

De uma forma geral, as alterações ocorridas no coberto florestal são devido a incêndios, cortes e novas plantações (Gonçalves, 2005). Nos Açores, fruto do clima húmido durante

todo o ano, os incêndios não são registrados. Por sua vez, os cortes e novas plantações são uma constante realidade no arquipélago, razão pela qual apenas será dada relevância a estes dois fatores. As alterações do coberto florestal apresentam características que as diferenciam, pois não ocorrem todas da mesma maneira nem têm a mesma origem. Assim, segundo Gong (2002), as alterações do coberto florestal podem ser divididas em alterações graduais ou abruptas (quanto à velocidade de mudança), longas ou curtas (quanto à duração da mudança), naturais ou antropogênicas (quanto à origem) e reversíveis ou irreversíveis (quanto à possibilidade de recuperação).

Para se identificar modificações no coberto florestal é necessário ter em consideração o processo que o originou. Um corte florestal pressupõe a existência de árvores com maturidade suficiente para serem exploradas, enquanto uma nova plantação corresponde à introdução de novas espécies de flora num terreno que pode ter sido preparado com esse objetivo através de um corte ou que foi vítima de um incêndio (Gonçalves, 2005). Estes diferentes processos exibem distintas características espectrais que podem ser identificáveis através de imagens de satélite (Gonçalves, 2005):

- Corte florestal – quando se realiza um corte florestal existe uma enorme diminuição da biomassa vegetal. Esta diminuição pode ser idêntica à ocorrida num incêndio florestal, no entanto, o corte não origina a formação de materiais carbonizados (característicos das áreas ardidas). Após o corte da vegetação em determinada área, o solo fica totalmente exposto, apresentando essa área uma refletância bem diferente da que anteriormente exibia. Nesta fase pode, ainda, existir a confusão espectral com novas plantações, pois, não só ficam no solo os resíduos florestais resultantes do corte, como também passam a ficar expostos os arbustos que antes estavam cobertos pelas árvores. Estes fatores levam a que os cortes apresentem diferentes comportamentos ao longo do espectro eletromagnético. Assim, temos:
 - Visível – nesta região do espectro eletromagnético a vegetação caracteriza-se por absorver energia na região do comprimento de onda do azul e do vermelho. Após o corte da vegetação, deixa de existir a produção de clorofila e, como consequência, passa a haver refletância de energia nos comprimentos de onda referidos. Assim, as áreas que tenham sido sujeitas a corte irão apresentar uma aparência muito mais clara do que áreas onde existe vegetação;

- Infravermelho próximo – o comportamento espectral da vegetação é caracterizado pelo aumento da refletância na passagem do visível para o infravermelho próximo, denominando-se esta região por *red edge*. Nesta região, a vegetação apresenta maior refletância que as áreas de corte. No entanto, com o aumento do comprimento de onda verifica-se a diminuição da refletância da vegetação, enquanto nas áreas de corte acontece o inverso. Estas áreas apresentam, também, refletância mais elevada que áreas de solo nu, pois os cortes de vegetação originam resíduos florestais, o que resulta na refletância da energia. Quando, após os cortes, a área é limpa, a refletância é idêntica à dos solos nus, sendo, por isso, necessário a utilização de imagens de satélite de diferentes datas para identificar as áreas de corte;
- Infravermelho médio – quando são observadas áreas de corte nesta região do espectro eletromagnético, verifica-se que a refletância sofre uma ligeira diminuição devido à existência de resíduos florestais ou arbustos que, por apresentarem humidade, absorvem alguma radiação. Neste intervalo de comprimento de onda, as áreas de corte apresentam menor refletância relativamente a áreas de solo nu, e maior refletância comparativamente às áreas com vegetação.
- Novas plantações – esta alteração do coberto florestal pressupõe a existência de várias fases. Numa primeira etapa, o terreno pode estar coberto por vegetação que irá desaparecer devido a um corte, incêndio ou outro fator. A fase seguinte pode ser confundida com outro tipo de alterações, dependendo da causa que levou à diminuição da vegetação (por exemplo, podem existir materiais carbonizados ou resíduos florestais). Posto isto, é necessária a preparação do terreno para a nova plantação. Neste período de tempo, que se aguarda os novos espécimes, o coberto apresenta-se como solo nu, o que pode gerar, igualmente, confusão. Por fim, a nova plantação começa a aparecer. Assim, para a identificação deste tipo de alteração é importante a existência de imagens de satélite de diferentes datas para se conseguir compreender a evolução temporal do terreno. Estas alterações no coberto florestal podem ser identificadas de diferentes formas ao longo do espectro eletromagnético:
 - Visível – uma nova plantação apresenta comportamentos diferentes nesta região do espectro dependendo da fase em que for detetada. Se a deteção ocorrer após a mobilização do terreno pode gerar confusão com o solo nu, uma vez que vai existir refletância em toda a região do visível. Se a deteção

for realizada após a inserção dos espécimes florestais, pode ocorrer confusão com áreas que possuem vegetação. Uma forma de distinguir novas plantações de áreas com vegetação é percebendo que a clorofila existente quando os novos espécimes estão em crescimento é menor do que em áreas com vegetação adulta. Assim, há uma ligeira redução de absorção na região do azul e do vermelho em áreas de novas plantações comparativamente à absorção que acontece nessas mesmas regiões do espectro na vegetação adulta;

- Infravermelho próximo – nesta região do espectro eletromagnético, o comportamento espectral das novas plantações vai ser idêntico ao de solo nu ou ao de vegetação, dependendo do momento em que for realizada a detecção (antes ou depois da inserção da nova plantação). Se a detecção for após a plantação de novos espécimes, então a passagem do vermelho para o infravermelho próximo (*red edge*) não vai ser tão abrupta e manter-se-á constante ao longo desta região do espectro. No entanto, neste caso há maior refletância do que em áreas com vegetação pois o solo está mais exposto do que em áreas florestais;
- Infravermelho médio – se as novas plantações forem detetadas com o terreno mobilizado, o comportamento é semelhante ao de terreno nu, ou seja, vai existir um aumento da refletância na passagem do infravermelho próximo para o médio e a absorção que ocorre durante este intervalo de comprimento de onda é ligeira e deve-se à humidade presente nos solos. No caso de já ter sido efetuada a plantação de novos espécimes, o comportamento espectral vai ser idêntico ao de áreas florestais. Assim, verifica-se um aumento da absorção nesta região do espectro devido à humidade existente nas plantas. No entanto, o nível de absorção irá variar, uma vez que as florestas apresentam maior biomassa que os novos espécimes e, por essa razão, vão apresentar uma maior absorção.

Posto isto, é necessário detetar as alterações propriamente ditas. Para tal, existe uma variedade de métodos e algoritmos. Não existe o método ideal, pois cada qual se adequa melhor para situações diferentes. Por vezes, pode existir necessidade de utilização de dois ou mais métodos em simultâneo para se obter melhores resultados, ou seja, para melhor se identificarem as possíveis alterações ocorridas. Outro problema acrescido deve-se à existência de uma enorme variedade de métodos e de algoritmos, dependendo estes de autor

para autor. Ou seja, não existe uma única linha orientadora que inclua todos os métodos ou algoritmos, sendo necessário um estudo mais abrangente sobre este assunto. No entanto, este fato não pode ser considerado totalmente negativo, pois, assim, não existe uma restrição para apenas determinados métodos, antes pelo contrário, existe a evolução dos já existentes e também o surgimento de outros novos.

Segundo Singh (1989), existem duas abordagens principais em estudos de detecção de alterações: (i) análise comparativa da classificação produzida para cada ano; (ii) análise simultânea de dados multi-temporais. Assim, de uma maneira geral, a detecção de alterações destaca-se, por um lado, pela utilização de classificadores para classificar cada imagem de cada data e, posteriormente, pela detecção de alterações e, por outro lado, ganha destaque através da análise de identificação de alterações de forma simultânea nas imagens obtidas para as diferentes datas.

Das diversas classificações por parte de vários autores, distingue-se a revisão efetuada por Lu *et al.* (2004), onde é apresentada uma classificação bastante diferenciada, distribuindo-se esta por sete categorias distintas:

- Álgebra – Esta categoria inclui diversas técnicas como a diferenciação, regressão e razão de imagens, diferenciação de índice de vegetação, análise de vetores de alteração e subtração do *background*. Estas técnicas necessitam de determinar o limiar que melhor identifica as áreas com alteração. Estes métodos são relativamente simples de se aplicar, à exceção da análise de vetores de alteração. No entanto, estes métodos têm a desvantagem de ser difícil determinar qual o melhor limiar que identifica as áreas com alterações. Nesta categoria, existem dois aspetos importantes que influenciam os resultados de detecção de alterações: seleção das bandas da imagem mais adequada ou índices de vegetação e a seleção dos limiares mais adequados que identifiquem as áreas com alterações. Relativamente aos índices de vegetação, será feita uma abordagem mais pormenorizada posteriormente;
- Transformação – Esta categoria inclui técnicas como a *Principal Components Analysis* (PCA), *Tasselled cap* (KT), *Gramm-Schmidt* (GS) e Qui-quadrado. Os referidos métodos apresentam a vantagem de eliminarem a correlação entre as bandas espectrais, aumentando a discriminação entre as áreas onde ocorreu alteração e não alteração. No entanto, não é possível obter com estes métodos matrizes de alterações com pormenor, sendo para isso necessário o estabelecimento de limiares para identificar as alterações. Existe, também, a dificuldade na interpretação e classificação da informação das alterações nas imagens transformadas;

- Classificação – Nesta categoria estão incluídas a pós-classificação, análise combinada espaço-temporal, algoritmo de máxima verosimilhança, identificação de alterações recorrendo à classificação não-assistida, detecção de alterações híbridas e redes neurais. Estes métodos são baseados nas classificações das imagens onde a qualidade e quantidade de áreas de treino são um aspeto crucial para se produzirem resultados de classificação de boa qualidade. Estes métodos têm como grande vantagem a produção de matrizes com a informação das alterações e a redução dos impactos externos provenientes de diferenças da atmosfera e ambientais entre as imagens de diferentes datas;
- Modelos avançados – Neste ponto, estão incluídos o modelo de refletância *Li-Strahler*, modelo de mistura espectral e modelo de parâmetros biofísicos. Nesta categoria, os valores refletidos são convertidos para parâmetros físicos ou frações através de modelos lineares ou não lineares. Os parâmetros transformados são mais intuitivos para interpretar e são melhores do que as assinaturas espectrais para extrair informação sobre a vegetação. A desvantagem que segue esta categoria é o tempo despendido e a dificuldade de processar o desenvolvimento de bons modelos para a conversão dos valores de refletância em parâmetros biofísicos;
- SIG – Nesta categoria incluem-se técnicas combinadas com recurso aos SIG e à detecção remota e métodos puros com recurso aos SIG. A grande vantagem desta categoria é a possibilidade de incorporar grandes quantidades de dados e de diferentes fontes. Pode acontecer que esta incorporação, com diferentes níveis de exatidão, afete os resultados da detecção de alterações. Assim, esta incorporação de informação tem de ser feita segundo critérios bastantes rigorosos;
- Análise visual – A categoria análise visual inclui a interpretação de compósitos de imagens de diferentes datas e a sua delineação no ecrã das áreas com alterações. Este método depende da experiência e conhecimento que o analista possui. A textura, a forma, o tamanho e padrões das imagens são elementos importantes para a identificação de alterações no uso do solo/coberto do solo através da interpretação visual. Normalmente, estes elementos não são usados em análises digitais de detecção de alterações devido à dificuldade em extrair tais elementos. No entanto, através de interpretação visual de um analista perito é possível incorporar todos estes elementos para auxiliar na elaboração de decisões sobre alterações no uso do solo/coberto do solo. A desvantagem desta categoria deve-se ao fato de se consumir muito tempo quando aplicável a grandes áreas sendo, também, difícil de realizar atualizações num curto período de tempo. É, igualmente, árduo providenciar trajetórias de alterações

em detalhe. Esta categoria está dependente, em grande parte, da qualidade de análise por parte do analista;

- Outras técnicas de detecção de alterações – Incluem-se nesta categoria os métodos que não se enquadram em nenhuma das categorias referidas anteriormente, ou que não foram postos frequentemente em prática, como é o caso das curvas de alteração e métodos geoestatísticos.

Os índices de vegetação apresentam-se como uma relevante ferramenta de extração de informação sobre uma característica específica do uso do solo/ocupação do solo – a vegetação. Através da utilização de índices de vegetação é possível obter-se informação sobre o estado de desenvolvimento da vegetação e avaliam o seu contributo espectral em estudos multiespectrais (Chen *et al.*, 1999). Para que este cálculo seja possível é necessário haver transformação de bandas, onde é feita uma redução dos dados existentes nas várias bandas numa única, possibilitando obter informação não só qualitativa como também quantitativa relativamente à vegetação existente em determinada área. Estes dados devem ser adquiridos através dos comprimentos de onda que melhor identificam as características da vegetação. Na generalidade os dados utilizados provêm dos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo, devido ao contraste de refletância presente entre eles e a sua relação com as características da vegetação (Jensen, 1996).

Perante o vasto leque de índices de vegetação existentes na atualidade, a decisão por um deles baseia-se, maioritariamente, na capacidade que este tem de identificar apenas as características da vegetação sem ser influenciado pelos fatores externos, pois os índices de vegetação podem ser influenciados negativamente pelas condições atmosféricas e do solo (Gonçalves, 2005).

Os principais índices de vegetação são:

- NDVI – Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*);
- ARVI – Índice de Vegetação Resistente à Atmosfera (*Atmosphere Resistant Vegetation Index*);
- SAVI – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index*).

O NDVI, desenvolvido por Rouse *et al.* (1973) foi um dos primeiros índices a aparecer e é o mais divulgado e utilizado. Este índice utiliza as bandas do infravermelho próximo e do vermelho (Equação 1) e uma das grandes vantagens é a normalização dos resultados,

variando estes de -1 a 1, o que facilita ao analista uma melhor avaliação dos mesmos (Caetano, 2011). Assim, valores de NDVI compreendidos entre -1 e 0 indicam áreas sem vegetação enquanto valores entre 0 e 1 representam áreas com vegetação. No entanto, estes intervalos de valores não são assim tão lineares, pois uma área com valor 0 de NDVI é uma área sem vegetação, ou seja, áreas com vegetação apresentam valores mais perto de 1 (Weier e Herring, 2001).

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

IVP = Banda do infravermelho próximo;

V = Banda do vermelho.

Algumas críticas põem em causa este índice, uma vez que o mesmo é influenciado por fatores externos à vegetação, como é o exemplo da atmosfera e do solo. Este índice é fortemente influenciado pelo brilho do solo no valor final. Assim, para a mesma estrutura de vegetação, os solos mais escuros ou com maior humidade, proporcionam um aumento do valor do índice NDVI (Gonçalves, 2005). Para minimizar estes aspetos é utilizada uma composição multi-temporal do NDVI, através do método do valor máximo do NDVI, onde é criada uma imagem em que, a cada pixel que a compõe é atribuído o valor máximo do NDVI, encontrado nas imagens que criam a composição (Kaufman e Tanré, 1992).

Um grande benefício da normalização deste índice é a redução dos efeitos solar e topográfico, o que proporciona a comparação de dados de diferentes épocas ou de diferentes sensores. O sucesso do NDVI é visível na aplicação de estudos a escalas locais, regionais e globais (Gonçalves, 2005).

O ARVI foi desenvolvido por Kaufman e Tauré (1992) e o seu propósito inicial foi o de ser aplicado a imagens do sensor MODIS. Tem o benefício de integrar, não só os comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo, como também o comprimento de onda do azul, bem como um fator de correção (Kaufman e Tauré, 1992) (Equação 2).

$$ARVI = \frac{IVP - [V - ca \times (A - V)]}{IVP + [V - ca \times (A - V)]} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

IVP = Banda do infravermelho próximo;

V = Banda do vermelho;
A = Banda do azul;
ca = Fator de correção.

Segundo Kaufman e Tanré (1992), *ca* está diretamente dependente da atmosfera, nomeadamente, do tipo de acessórios existentes nela e, em caso de inexistência de dados sobre estes, deve registar o valor de 1. Quando apresenta um valor igual ao do NDVI deverá tomar o valor de 0. Uma das características que define o ARVI é a sua aptidão para resistir aos efeitos atmosféricos, atributo esse resultante da autocorreção que utiliza a diferença entre radiância das bandas do vermelho e do azul, de modo a retificar a radiância da banda do vermelho (Huete e Hui, 1994). Este método oferece como benefício uma diminuição da sensibilidade aos efeitos atmosféricos, principalmente em áreas que se encontrem cobertas por vegetação (Kaufman e Tanré, 1992).

O ARVI proporciona uma interpretação facilitada dos dados, derivada da sua gama de variação ser entre -1 e 1 (Santos *et al.*, 1999), e a sua aplicação tem tido êxito essencialmente a escalas regionais (Gonçalves, 2005).

O SAVI foi desenvolvido por Huete (1988) com o objetivo de diminuir a influência que a refletância da radiação refletida pelo solo provocava nos valores do índice de vegetação. Esta refletância ocorre devido às propriedades da vegetação e do solo. A vegetação, caracterizada por absorver o vermelho e refletir o infravermelho próximo, acaba por transmitir e dispersar este último comprimento de onda para o solo, que por sua vez irá refleti-lo (Huete, 1988) (Equação 3).

$$SAVI = \frac{(1 + L) \times (IVP - V)}{IVP + V + L} \quad \text{(Equação 3)}$$

onde:

IVP = Banda do infravermelho próximo;

V = Banda do vermelho;

L = Agente de calibração do solo.

Ao contrário do NDVI, o índice de vegetação SAVI facultou um agente de calibração do solo, de modo a ter em consideração as interações de primeira ordem entre o solo e a vegetação (Huete e Hui, 1994). Com o objetivo de diminuir a influência do solo, o fator de calibração resulta na translação da origem dos eixos do espaço espectral do vermelho e infravermelho próximo (Huete, 1988) e deve ser inversamente proporcional à densidade do coberto vegetal (Gonçalves, 2005). No entanto, estudos realizados em oito tipos de solos

diferentes, e com distintos graus de humidade e de cobertos vegetais, concluíram que a utilização de um valor constante (0,5) para L poderia ajudar a modelar o comportamento espectral da relação vegetação-solo, diminuindo, deste modo, a influência do solo no índice de vegetação (Huete, 1988). O SAVI, igualmente como o NDVI e o ARVI, apresenta, também, um intervalo de valores entre -1 e 1 (Gonçalves, 2005).

2.2.2.1. Metodologias de deteção de alterações – considerações finais

Após a revisão das metodologias anteriormente mencionadas, a que se apresenta como sendo a mais adequada para o presente trabalho é a combinação de dois métodos de deteção de alterações, mais concretamente, a Classificação e a Álgebra, utilizando-se para estes o *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* (ISODATA) e o NDVI, respetivamente. Com a combinação destes métodos desenvolve-se uma metodologia que, por um lado, elimina áreas que não são necessárias para o estudo em questão, e por outro, determina o índice de vegetação de imagens de diferentes datas e as respetivas alterações na vegetação ocorridas entre elas.

O ISODATA é um classificador que se distingue por ser um método praticamente independente do analista. Para que funcione, apenas é necessário que o analista indique o número máximo de agregados que pretende, o número máximo de iterações que se pretende realizar, o número máximo da unidade espacial de análise (UEA) em cada agregado e o limiar de convergência. O ISODATA recorre a diversas iterações e em cada uma realiza-se uma passagem por todas as UEAs da imagem. Esta tarefa cria agregados, que são definidos pela sua média, e a distância que separa uma UEA de um agregado é euclidiana. Em cada iteração cada UEA é atribuída a um agregado, com base na distância mínima. No final de cada iteração a média de cada agregado é calculada novamente para ter em conta a entrada e a saída de UEAs de cada agregado. O algoritmo termina quando o número de UEAs que não mudam de agregado de iteração é inferior a um limiar estabelecido pela analista ou quando o número máximo de iterações definido é atingido. Este método evidencia-se, também, por não ser influenciado pelas primeiras UEAs, pois é iterativo, e pelo mínimo input requerido ao analista (Caetano, 2011). Posto isto, no presente trabalho, o objetivo da utilização do ISODATA foi o de identificar as áreas que não eram importantes para o estudo (nuvens, sombras das nuvens, etc.), eliminando-as, de modo a centralizar a área de estudo apenas nos locais onde podem ocorrer alterações no coberto florestal.

O NDVI foi utilizado devido às suas propriedades de referência. Como foi visto anteriormente, este índice de vegetação tem mostrado uma elevada correlação com a

biomassa e com o índice da área de folhas verdes. Por um lado, as folhas saudáveis apresentam pouca refletância no vermelho mas elevada refletância no infravermelho próximo, apresentando, assim, valores de NDVI elevados, ou seja, perto de 1. Por outro lado, relativamente a superfícies impermeáveis (por exemplo, asfalto, edifícios, etc.) e solo nu (por exemplo, rochas, lama, etc.) apresentam valores similares de refletância tanto no vermelho como no infravermelho próximo, resultando em valores de NDVI perto de 0 (Thanapura *et al.*, 2007). Através destas propriedades, o NDVI foi aplicado em imagens de diferentes datas resultando em imagens de NDVI para cada data. Com estas imagens foi possível calcular a diferença entre elas, o que resultou numa imagem de diferença de NDVIs onde foi possível verificar as alterações ocorridas na vegetação entre diferentes períodos temporais.

3. Metodologia para a deteção de alterações através do método de diferenças de imagens através do *Normalized Difference Vegetation Index*

Este capítulo tem o propósito de originar uma metodologia exequível para a identificação de alterações ocorridas na ocupação do solo de inventários florestais. Para a realização deste trabalho foi seleccionada como área de estudo a ilha de São Miguel, situada no Arquipélago dos Açores. De uma maneira geral, esta metodologia baseia-se na comparação de dois momentos temporais da ilha de São Miguel utilizando a diferença de NDVIs e seleccionando os limiares que melhor identificam as alterações na ocupação do uso do solo do IFRAA, tanto para o crescimento como o decréscimo da vegetação (Figura 6).

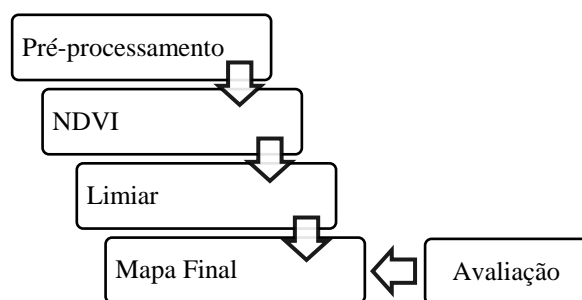


Figura 6 – Fluxograma metodológico para a deteção de alterações ocorridas na ocupação do solo do IFRAA.

No presente caso, ambas as imagens foram pré-processadas antes da sua disponibilização para o público. De seguida aplicou-se o NDVI em cada uma das imagens. Com este índice de vegetação calculado para cada data, foi calculada a diferença de NDVIs entre as duas épocas temporais, realizando-se a avaliação da imagem resultante. Posto isto, foi identificado, individualmente, o limiar que melhor caracterizasse o crescimento e o

decréscimo da vegetação, separadamente. Identificadas as áreas onde ocorreram as alterações no coberto florestal do IFRAA, criou-se um mapa final com o IFRAA e as respetivas alterações.

3.1 Descrição dos dados

Para a elaboração desta parte do trabalho foram utilizadas duas imagens de satélite do programa *Système Pour l'Observation de la Terre* (SPOT), o IFRAA da ilha de São Miguel em formato vetorial, fornecido pela DRRF, e a Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP) (CAOP, 2012) também em formato vetorial.

3.1.1. Imagens de satélite

O programa SPOT, criado pelo *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), teve início em 1986 e até ao presente foram lançados cinco satélites, estando programados o lançamento de mais dois para 2012 e 2013 (Astrium, 2012). Os satélites SPOT destacaram-se desde cedo por apresentarem um espelho móvel à frente do sistema ótico, que era controlado por uma estação no terreno, o que permitia observações *off-nadir* (observações até um ângulo de 27° do *nadir*), enquanto a maioria dos outros satélites realizava observações apenas na vertical, ou seja, observações no *nadir*. Este sistema apresenta algumas vantagens como o aumento da frequência de observação de uma determinada área e a cobertura estereoscópica, permitindo a derivação de modelos digitais de terreno (Caetano, 2011).

Os satélites deste programa apresentam designações desde SPOT 1 até SPOT 5, dependendo da fase de lançamento. No presente, apenas se encontram em funcionamento o SPOT 4 e SPOT 5. Estes satélites apresentam características semelhantes (Tabela 4) e um tipo de órbita igual (Astrium, 2012):

- Polar – Combinada com a rotação da Terra em torno do eixo polar, a inclinação do plano orbital (98°) permite que os satélites sobrevoem qualquer ponto da Terra num período de 26 dias;
- Circular – Apresentam uma altitude constante em relação à superfície da Terra;
- Hélio-síncrona – O plano orbital destes satélites forma um ângulo constante em relação à direção do sol, o que significa que as condições de iluminação são as mesmas sempre que os satélites sobrevoam o mesmo local;
- Faseada – Todos os 26 dias, cada satélite SPOT sobrevoa os mesmos pontos no terreno. Durante este período de tempo, cada satélite vai realizar um número inteiro

de revoluções (369) completando um ciclo completo de faixa (o satélite executa 14 + 5/26 revoluções por dia). Este padrão repete-se várias vezes.

Caraterísticas	SPOT 4	SPOT 5
Data de lançamento	24-03-1998	4-05-2002
Instrumentos	HRVIR (<i>High Resolution Visible – Infrared</i>)	HRG (<i>High Resolution Geometrical</i>)
Altitude no Equador	822 km	822 km
Inclinação	98,7°	98,7°
Velocidade	7,4 km/s	7,4 km/s
Período orbital	101,4 minutos	101,4 minutos
Resolução temporal	26 dias	26 dias
Bandas espectrais e resolução espacial	1 pancromática (10 m) 3 multiespectrais (20 m) 1 infravermelho de onda curta (20 m)	2 pancromáticas (5 m) que se combinam para originar um produto de 2,5 m 3 multiespectrais (10 m) 1 infravermelho de onda curta (20 m)
Resolução espectral	M: 0,61 – 0,68 μm B1 (verde): 0,50 – 0,59 μm B2 (vermelho): 0,61 – 0,68 μm B3 (Infravermelho próximo): 0,78 – 0,89 μm B4 (Infravermelho de onda curta): 1,58 – 1,75 μm	P: 0,48 – 0,71 μm B1 (verde): 0,50 – 0,59 μm B2 (vermelho): 0,61 – 0,68 μm B3 (Infravermelho próximo): 0,78 – 0,89 μm B4 (Infravermelho de onda curta): 1,58 – 1,75 μm
Resolução radiométrica	8 bits	8 bits
Swath	60 km x 60 km	60 km x 60 km

Tabela 4 – Caraterísticas do sensor HRVIR do satélite SPOT 4 e do sensor HRG do satélite SPOT 5 (Astrium, 2012).

Os satélites SPOT 4 e SPOT 5 ostentam, ainda, mais um sensor adicional, denominado VEGETATION (Tabela 5). Este sensor tem como principal objetivo realizar medições precisas de caraterísticas sobre o coberto vegetal do planeta. Tanto o sensor VEGETATION do SPOT 4 como do SPOT 5 apresentam uma resolução espectral idêntica aos sensores HRVIR e HRG mas com o acréscimo de captarem também na zona do azul do espectro eletromagnético.

Caraterísticas	SPOT 4	SPOT 5
Bandas espectrais	4	4
Instrumento	VEGETATION 1	VEGETATION 2
Resolução temporal	1 dia	1 dia
Resolução espacial	1 km	1 km
Resolução espectral	B0: 0,45 – 0,52 μm B2: 0,61 – 0,68 μm B3: 0,78 – 0,89 μm B4: 1,58 – 1,75 μm	B0: 0,45 – 0,52 μm B2: 0,61 – 0,68 μm B3: 0,78 – 0,89 μm B4: 1,58 – 1,75 μm
Resolução radiométrica	10 <i>bits</i>	10 <i>bits</i>
<i>Swath</i>	2250 km	2250 km

Tabela 5 – Caraterísticas do sensor VEGETATION dos satélites SPOT 4 e SPOT 5 (Astrium, 2012).

Relativamente às imagens utilizadas para a realização deste trabalho ambas fazem parte do programa SPOT, fazendo uma parte do satélite SPOT 4 e outra do SPOT 5 (Tabela 6), sendo esta disponibilizada pelo programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) (GMES-SCD, 2012). A escolha destes sensores teve por base as suas caraterísticas espectrais, pois ambos captam a energia na zona do espectro eletromagnético do vermelho (B2: 0,61 – 0,68 μm) e do infravermelho próximo (B3: 0,78 – 0,89 μm), fundamentais para o cálculo do NDVI. A resolução espacial das bandas a utilizar nos dois satélites é diferente, sendo a do SPOT 4 de 20 m e a do SPOT 5 de 10m. Este é um fator negativo pois, o ideal para estudos multi-temporais é a utilização de imagens com a mesma resolução espacial. No entanto, para o presente estudo não foi possível ter acesso a imagens de resolução espacial igual. Como tal, foi necessário redimensionar o tamanho do pixel de uma das imagens de modo a possibilitar que ambas apresentassem pixéis de tamanho igual. É de notar, também, que as duas imagens de satélite não ocupam a totalidade da ilha de São Miguel, reduzindo assim a área de estudo (Figura 7, 8 e 9).

Importa ainda referir que as imagens de satélite foram captadas mais ou menos na mesma época do ano, sendo uma de novembro de 2006 e a outra de outubro de 2010. Este aspeto é relevante em estudos de deteção de alterações pois imagens da mesma época do ano apresentam caraterísticas semelhantes, evitando perturbações a nível do efeito topográfico, o que resulta na diminuição de possíveis erros provocados por diferentes ângulos de iluminação.

Caraterísticas	SPOT 4	SPOT 5
Data de aquisição	27-11-2006	31-10-2010
Resolução espacial das bandas espectrais	20 m	10 m
Bandas espectrais	B2: (vermelho): 0,61 – 0,68 μm B3: (Infravermelho próximo): 0,78 – 0,89 μm	B2: (vermelho): 0,61 – 0,68 μm B3: (Infravermelho próximo): 0,78 – 0,89 μm

Tabela 6 – Caraterísticas das imagens de satélite utilizadas.

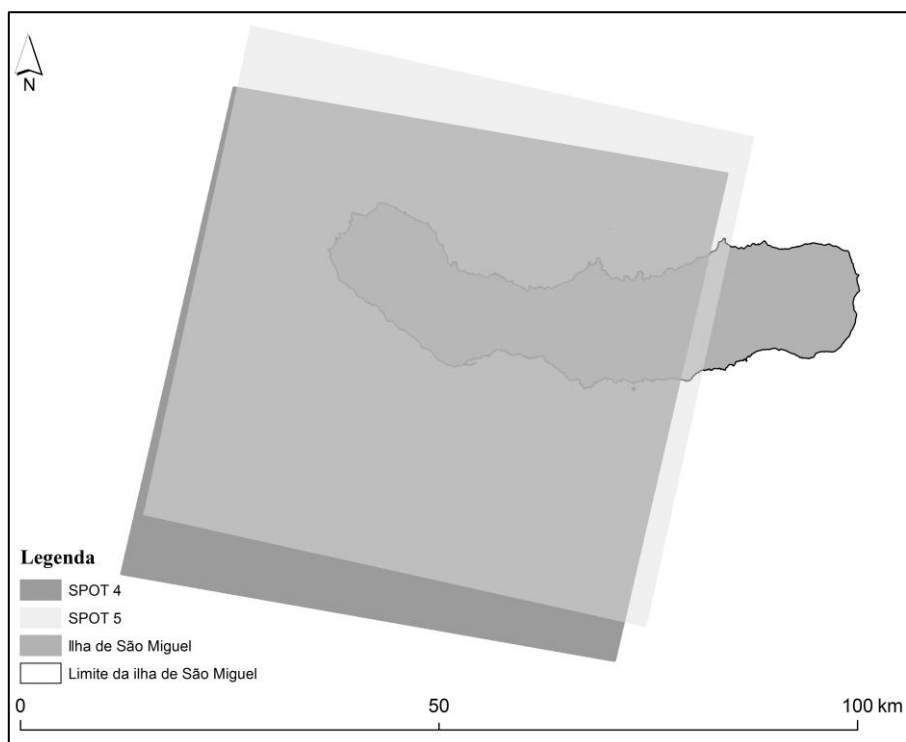


Figura 7 – Disposição das duas imagens de satélite relativamente à ilha de São Miguel.

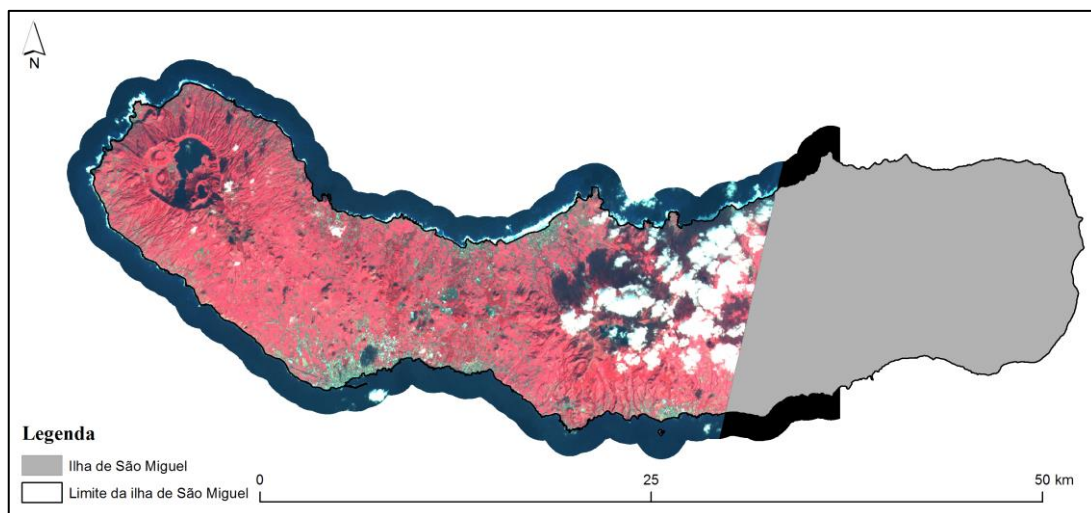


Figura 8 – Imagem capturada pelo satélite SPOT 4 em 2006 da ilha de São Miguel, com a composição RGB123.

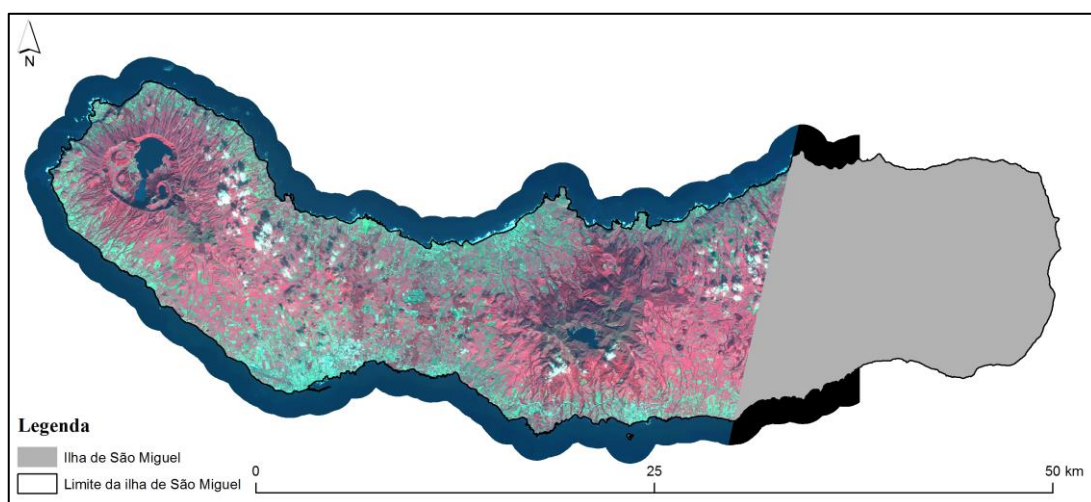


Figura 9 – Imagem capturada pelo satélite SPOT 5 em 2010 da ilha de São Miguel, com a composição RGB123.

3.2. Pré-processamento

O pré-processamento das imagens de satélite é uma etapa fundamental a realizar no início de estudos multi-temporais. Este passo leva à diminuição de possíveis erros introduzidos no momento de aquisição de cada imagem, melhorando a qualidade das mesmas. No presente caso, ambas as imagens utilizadas foram disponibilizadas com o pré-processamento efetuado. No entanto, sendo uma etapa de grande importância segue-se uma breve descrição deste processo, mais concretamente da correção geométrica e radiométrica.

3.2.1. Correção geométrica

A correção geométrica tem como objetivo a correção de erros geométricos sistemáticos ou não sistemáticos. As distorções sistemáticas correspondem a erros previsíveis e as suas origens são conhecidas, como por exemplo a rotação da Terra, a curvatura da Terra, a velocidade do satélite, distorções panorâmicas e não-linearidades na velocidade de varrimento (*scanning*). As distorções não sistemáticas correspondem a erros aleatórios que não são previsíveis e podem acontecer devido a perturbações na plataforma do satélite, por exemplo desvio do satélite da sua altitude normal (Caetano, 2011).

Um importante passo na utilização de imagens de satélite de diferentes datas para a deteção de alterações é a orto-retificação das imagens. Para tal, é necessário recorrer a pontos de controlo (pontos de coordenadas conhecidas, tanto na imagem de referência como na imagem a corrigir) e à utilização de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para reduzir distorções provenientes do relevo (Nunes, 2007). Nesta mesma fase, as imagens são, igualmente, georreferenciadas para o mesmo sistema de coordenadas. Por vezes, em estudos de deteção de alterações da vegetação através do NDVI realiza-se uma análise rigorosa pixel a pixel. Assim, cada pixel de uma imagem de satélite tem de coincidir exatamente com o pixel da outra imagem, de modo a se obter os resultados desejados (Tan *et al.*, 2011).

Devido à diferença de resolução espacial entre as duas imagens de satélite, também foi necessário proceder à correção desta. Este processo realizou-se através da operação *resample* presente na extensão *ArcToolbox* do *software ArcGIS 10*®, utilizando o método da interpolação bilinear. Através deste procedimento é possível calcular o ND de determinado pixel na imagem corrigida numa média calculada pela distância dos NDs dos quatro pixéis vizinhos da imagem original em duas direções ortogonais. Esta metodologia compreende, numa fase inicial, o ajustamento de um plano aos 4 pixéis definidos nas direções assinaladas e posteriormente, o cálculo de um novo ND com base numa média ponderada pela distância (Caetano, 2011). Foi através desta metodologia que se redimensionou o tamanho dos pixéis da imagem SPOT 4 de 20m para 10m. Através deste procedimento, ambas as imagens passaram a ter o tamanho do pixel igual, ou seja, 10m. Neste procedimento, salvaguarda-se a informação contida nos pixéis da imagem SPOT 5, que tem mais detalhe que a SPOT 4, enquanto cada pixel da imagem SPOT 4 é dividido para que, sem perder informação, apresente o mesmo tamanho que os pixéis da SPOT 5. Segundo Jensen (2000), esta transformação não apresenta problemas significativos mas é importante ter em atenção que a informação dos dados reamostrados do mapa final não são maiores que o IFOV do sensor original, ou seja, mesmo que o tamanho do pixel seja de 10m, a informação continua a ser

correspondente a 20m. Esta transformação, não afetou o resultado final visto o mapa final ser produzido pela seleção de áreas iguais ou maiores que 4ha.

3.2.2. Correção radiométrica

Num sistema de detecção remota perfeito, o valor do ND de determinado pixel deveria equivaler à energia refletida pela área correspondente a esse pixel. No entanto, como já foi visto, isto não acontece pois vários fatores (por exemplo, atmosfera, topografia) interagem com a energia antes de esta chegar ao sensor. A correção radiométrica tem como objetivo a redução deste tipo de erros e está relacionada com o tipo de sensor a ser utilizado e com o tipo de estudo que se está a desenvolver (Nunes, 2007).

Em estudos multi-temporais, a correção das distorções radiométricas é muito importante, principalmente em estudos de identificação de alterações da vegetação através do NDVI (Tan *et al.*, 2011). No presente caso, as imagens apresentavam-se corrigidas radiometricamente e apenas se utilizou o método *Dark Object Subtraction* (DOS). Neste método, presume-se que qualquer radiação recebida no sensor para um pixel de objeto escuro advém do percurso da radiação atmosférica. Desta forma, os pixéis que contêm os menores valores de ND são selecionados a partir da imagem e o seu valor representativo é subtraído dos ND de toda a imagem com o objetivo de reduzir influências de espalhamento. Os objetos escuros devem ser cuidadosamente escolhidos. Por exemplo, corpos de água limpa e vegetação escura sob sombras são normalmente escolhidos como objetos escuros (Chavez, 1996). No presente estudo, visto existirem nuvens e sombras provocadas por estas nas imagens de satélite, foi, também, criada uma máscara para as excluir.

3.3. Métodos

A primeira fase da metodologia foi a extração da área de estudo. Como tal, foram desenvolvidos diversos passos, como se pode verificar pelo diagrama da Figura 10. Assim, foi criada uma *shapefile* com as áreas a excluir das imagens de satélite de modo a se obter a área de estudo. Esta *shapefile* foi concebida conjugando os limites da ilha de São Miguel com as áreas do IFRAA que não se mostraram relevantes para o presente estudo (os Planos de água, a Rede viária, os Agregados urbanos, as Áreas sociais e as Áreas por apurar) (Figura 11). O passo seguinte foi eliminar essas áreas de ambas as imagens. Posto isto, recorrendo ao método de classificação ISODATA, procedeu-se à identificação das nuvens e respetivas sombras e à criação de uma máscara de modo a que esses fatores atmosféricos fossem excluídos. Este método foi realizado em ambas as imagens, separadamente, de modo a se obter as nuvens e suas sombras de ambos os espaços temporais (Figura 12).

Posteriormente, a informação obtida foi agregada e retirada das duas imagens de satélite, alcançando-se, finalmente, a área de estudo (Figura 13).

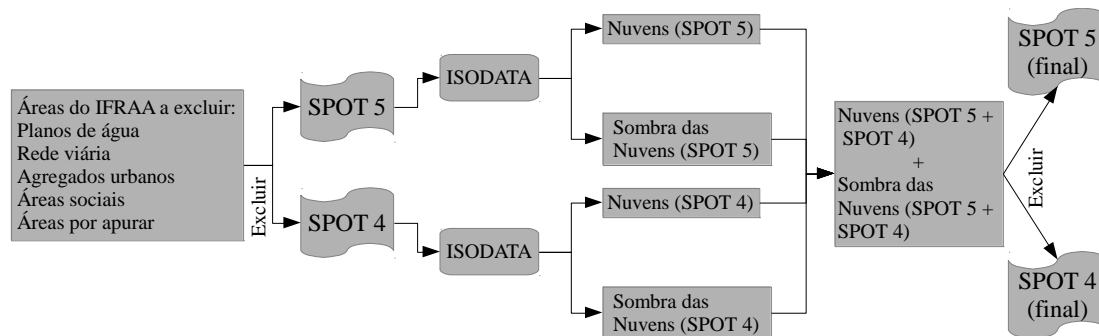


Figura 10 – Diagrama explicativo da extração das áreas a excluir de modo a se obter a área de estudo.

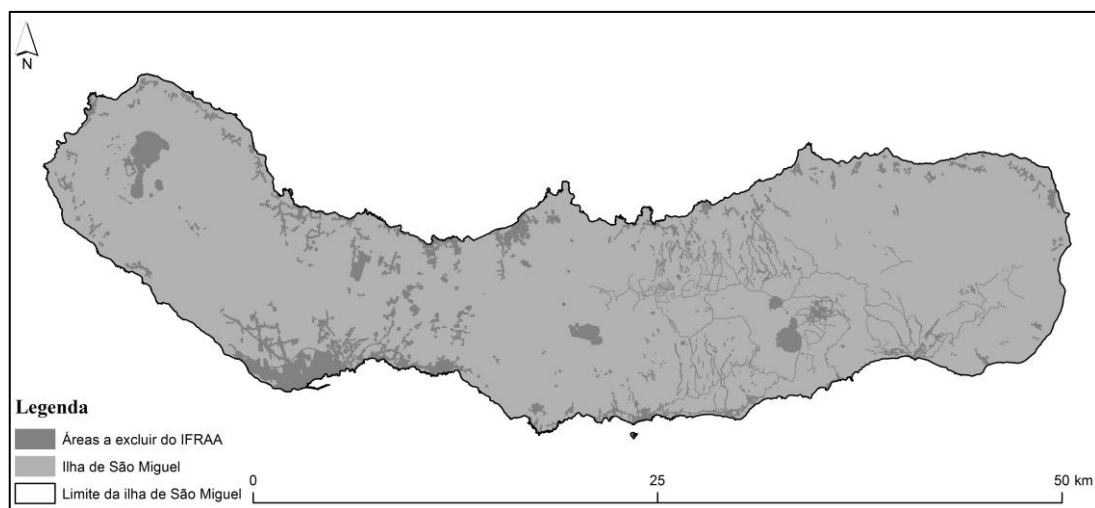


Figura 11 – Áreas das categorias do IFRAA a excluir.

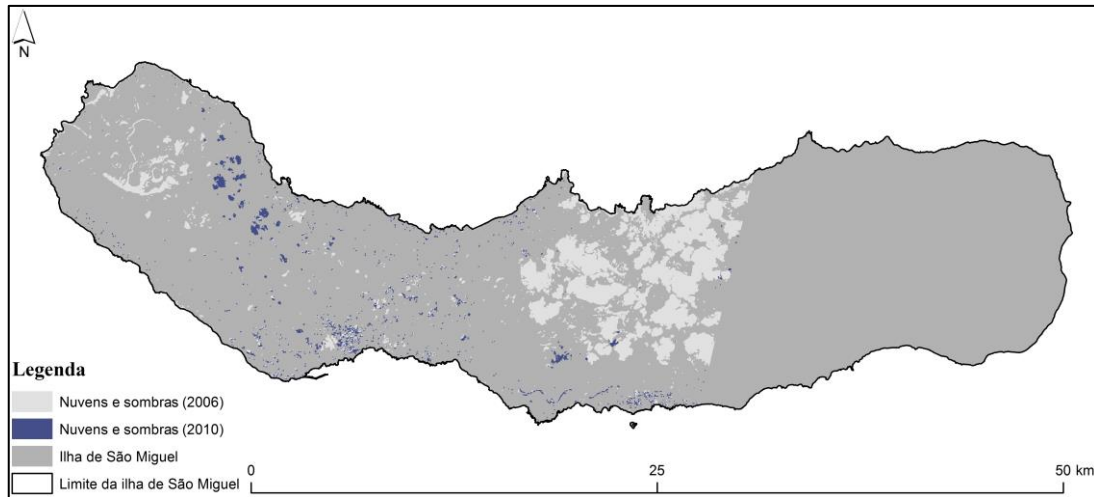


Figura 12 – Extração das nuvens e suas sombras das imagens de satélite através do método de classificação ISODATA.

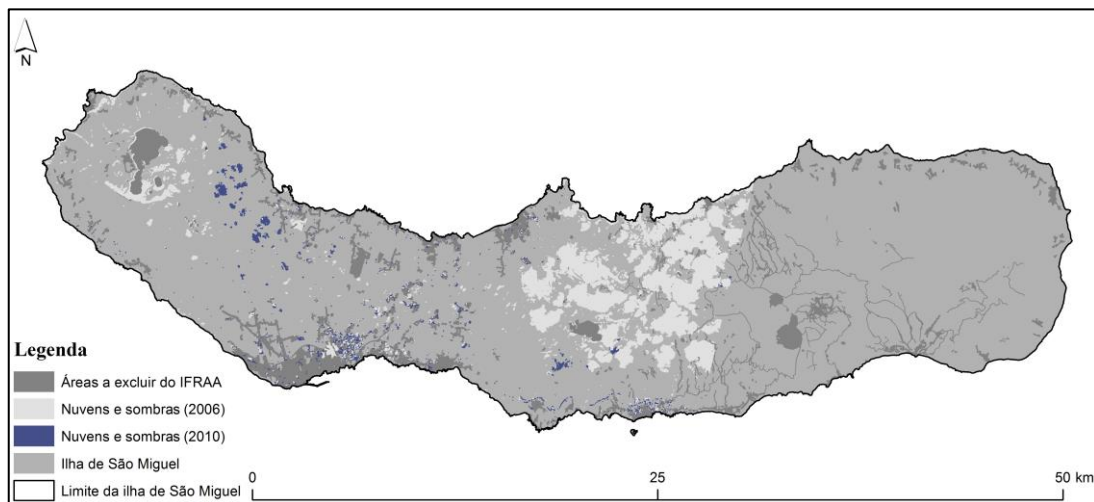


Figura 13 – Áreas a excluir de ambas as imagens de satélite de modo a se obter a área de estudo.

Após obter-se a área de estudo foi calculado, através do *Raster calculator*, o NDVI para o ano 2006 e 2010 com as bandas 2 (vermelho) e 3 (infravermelho próximo) de cada imagem (Equação 4 e 5). Por fim, subtraiu-se o NDVI de 2010 ao NDVI de 2006, resultando uma imagem com a diferença de NDVIs entre os dois anos (Equação 6).

$$NDVI_{2006} = \frac{Float(SPOT2006_B3) - Float(SPOT2006_B2)}{Float(SPOT2006_B3) + Float(SPOT2006_B2)} \quad (\text{Equação 4})$$

$$NDVI_{2010} = \frac{[Float(SPOT2010_B3) - Float(SPOT2010_B2)]}{[Float(SPOT2010_B3) + Float(SPOT2010_B2)]} \quad (\text{Equação 5})$$

$$dNDVI = NDVI_{2010} - NDVI_{2006} \quad (\text{Equação 6})$$

A imagem que se obteve apresentava os valores da diferença de NDVIs entre as imagens das diferentes datas. Assim, por exemplo, tendo um pixel na imagem de 2006 com valor de NDVI de 1, e um na imagem de 2010 com o valor de NDVI de 0, então o valor de NDVI que se obtém no correspondente pixel na imagem de diferença de NDVIs é de -1, o que significa decréscimo da vegetação nesse local. No entanto, tal não funciona de forma linear na realidade. Por isso, foi necessário recorrer a valores de limiares derivados da média e do desvio padrão da imagem de diferença de NDVIs para se determinar uma verdadeira alteração (Pu *et al.*, 1998). No presente trabalho foi seguida a metodologia aplicada por Pu *et al.* (1998) para determinar os valores de limiar a aplicar (Figura 14).

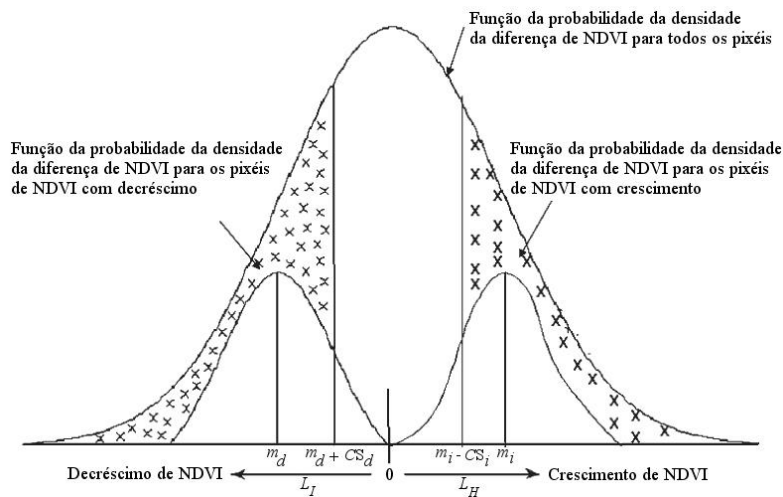


Figura 14 – Histograma que representa a função da probabilidade da densidade da diferença de NDVIs, onde m_d e m_i são a média de decréscimo e de crescimento, respetivamente; s_d e s_i são o desvio padrão de decréscimo e de crescimento, respetivamente; c corresponde ao coeficiente; L_I e L_H representam o limiar de decréscimo e de crescimento, respetivamente (adaptado de Pu *et al.*, 2008).

Na prática, os limiares são especificados com o valor 1 de desvio padrão a partir da média (onde normalmente o pixel na imagem de diferença de NDVIs é 0) ou com algumas modificações ao desvio padrão. Tradicionalmente, ambos os limiares da média da imagem de diferença apresentam os mesmos valores e podem determinar um ótimo índice de exatidão. Devido às características assimétricas do histograma de uma imagem de diferença, acredita-se que ambos os limiares da média da imagem de diferença podem variar, ou seja, ambas as frações do índice, de decréscimo e de aumento, diferem na maioria dos casos.

Assim, os limiares utilizados neste estudo foram derivados da média e do desvio padrão das frações de decréscimo e de crescimento do índice, separadamente. Assumindo-se que existe uma distribuição normal para os segmentos de crescimento e decréscimo de NDVI, que determina a média (md – média de decréscimo e mi – média de crescimento) e o desvio padrão (sd – desvio padrão de decréscimo e si – desvio padrão de crescimento), o coeficiente, c , para calcular os limiares pode ser determinado por um ótimo $kappa$ ou outro índice de exatidão, levando, assim, à determinação dos diferentes limiares. Posto isto, os pixels que apresentam alteração podem ser compostos tanto pela fração de decréscimo de NDVI (valor do pixel $< md + c \times sd$) como pela fração de aumento de NDVI (valor do pixel $> mi - c \times si$) e os pixels sem alteração compõem-se pelos que se encontram entre os dois valores de limiares (Equação 7) (Pu *et al.*, 1998). Para a identificação do limiar que identificasse o decréscimo e o crescimento, separadamente, utilizaram-se diferentes combinações de valores de coeficiente (Tabela 7).

$$Limiar = Con(dNDVI < md - c \times sd, 1, Con(dNDVI > mi + c \times si, 2, 0)) \quad (\text{Equação 7})$$

onde:

md = Média de decréscimo;

mi = Média de crescimento;

c = Coeficiente;

sd = Desvio padrão de decréscimo;

si = Desvio padrão de crescimento.

		Valores de coeficiente para o decréscimo da vegetação				
		1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
Valores de coeficiente para o crescimento da vegetação	1,00	1,00; 1,00	1,00; 1,25	1,00; 1,50	1,00; 1,75	1,00; 2,00
	1,25	1,25; 1,00	1,25; 1,25	1,25; 1,50	1,25; 1,75	1,25; 2,00
	1,50	1,50; 1,00	1,50; 1,25	1,50; 1,50	1,50; 1,75	1,50; 2,00
	1,75	1,75; 1,00	1,75; 1,25	1,75; 1,50	1,75; 1,75	1,75; 2,00
	2,00	2,00; 1,00	2,00; 1,25	2,00; 1,50	2,00; 1,75	2,00; 2,00

Tabela 7 – Valores utilizados e respetivas combinações possíveis para melhor realçar o decréscimo e o crescimento da vegetação, separadamente.

Por fim, de modo a evidenciar as áreas onde ocorreram as alterações no coberto florestal do IFRAA, foi alterada a unidade mínima cartográfica (UMC) para 4ha e foi criado um mapa com as áreas de crescimento de vegetação e com as áreas de decréscimo. A razão da escolha

desta UMC recaiu no fato de se estar perante uma imagem com 10m de resolução espacial e, sobretudo, devido à pequena dimensão da área de estudo, pois uma alteração ocorrida numa área de pequena dimensão é mais significativa do que a ocorrida numa área de maior dimensão.

O último passo do presente trabalho centrou-se na importante tarefa da avaliação do mapa final. Foi efetuada uma avaliação qualitativa do referido mapa com base em interpretação visual. Como não foram disponibilizados ortofotomapas da área de estudo, recorreu-se aos mapas do Google Earth (Google, 2011). Desta forma, foi possível avaliar os resultados obtidos através da metodologia desenvolvida, ou seja, comprovar se as alterações ocorridas foram realmente em áreas de vegetação.

4. Resultados e discussão

4.1. Identificação das alterações ocorridas no Inventário Florestal da RAA

A ilha de São Miguel não foi utilizada na sua totalidade como área de estudo. Visto as imagens de satélite utilizadas não captarem toda a ilha, a existência de algumas nuvens e sombras em ambas as imagens, e algumas categorias apresentadas no IFRAA não se compatibilizarem com o estudo pretendido, a área de estudo final sofreu uma redução em relação à área da ilha de São Miguel. Na Tabela 8 apresentam-se as áreas e respetivas percentagens das categorias excluídas da referida ilha e é de notar que apenas 50% de São Miguel foi utilizado como área de estudo final (Figura 15). Estes fatores fizeram diminuir as áreas onde, possivelmente, poderiam ocorrer alterações no coberto florestal do IFRAA sendo possível verificar que a distribuição das áreas florestais localizam-se, na sua maioria, nas zonas mais montanhosas de São Miguel, ou seja, na Serra da Tronqueira, Lagoa do Fogo e Sete Cidades. Assim, devido às condições expostas, a zona onde seria de esperar o registo de maior número de alterações no coberto florestal do IFRAA restringiu-se às Sete Cidades (Figura 16). A restante área de estudo apresenta, na sua maioria, a categoria Culturas agrícolas ou pastagens, onde a alteração do coberto florestal é nula. No entanto, através do NDVI, foi possível verificar a ocorrência de alterações na vegetação nessas áreas.

Categorias	Área (ha)	Percentagem (%)
Áreas a excluir do IFRAA	5103,7	7%
Nuvens e sombras (2006)	5653,2	8%
Nuvens e sombras (2010)	386,5	1%

(continua na página seguinte)

Categorias	Área (ha)	Percentagem (%)
Áreas a excluir do IFRAA com as nuvens e sombras	11143,4	15%
Ilha de São Miguel não captada pelas imagens	27064,2	36%
Área de estudo final	37469,4	50%
Ilha de São Miguel	74457,5	100%

Tabela 8 – Categorias e respetivas percentagens correspondentes às áreas excluídas.

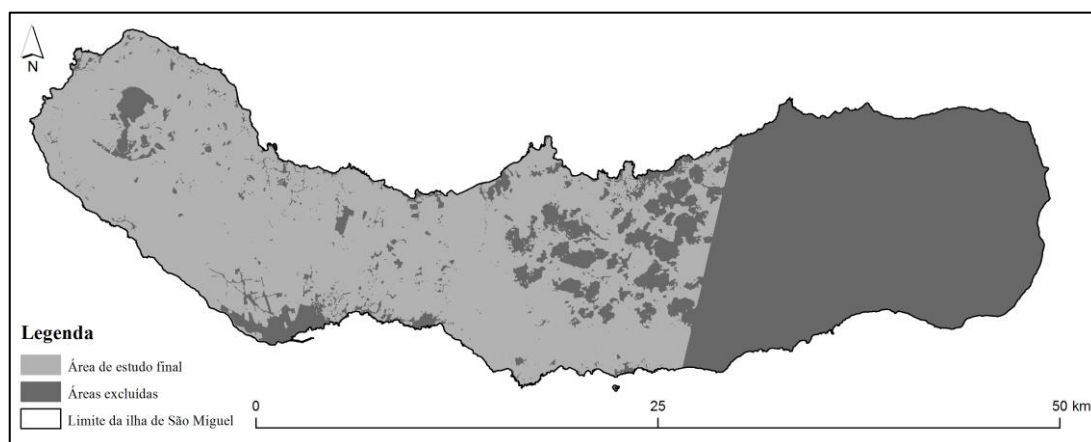


Figura 15 – Área de estudo.

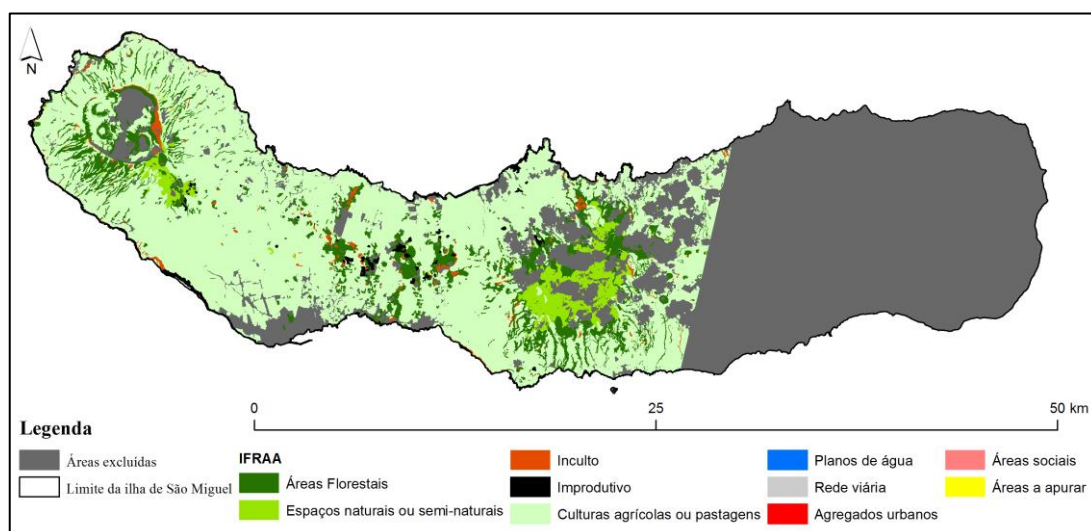


Figura 16 – Disposição das categorias do IFRAA na área de estudo.

Relativamente à área de estudo, foi calculado o NDVI para os dois espaços temporais, através do *Raster calculator* – NDVI_2006 e NDVI_2010 (Figura 17 e 18). Posto isto,

realizou-se a subtração destas imagens de modo a se obter uma imagem de diferença de NDVIs – dNDVI (Figura 19). Na Tabela 9 apresentam-se os valores mínimos, máximos, a média e o desvio padrão das respectivas imagens.

	NDVI_2006	NDVI_2010	dNDVI
Mínimo	-0,431193	-0,459459	-0,823602
Máximo	0,704467	0,363636	0,70392
Média	0,432303	0,153878	0,280667
Desvio padrão	0,149300	0,078377	0,155105

Tabela 9 – Valores obtidos através do cálculo do NDVI de 2006, de 2010 e a respetiva diferença entre esses mesmos anos.

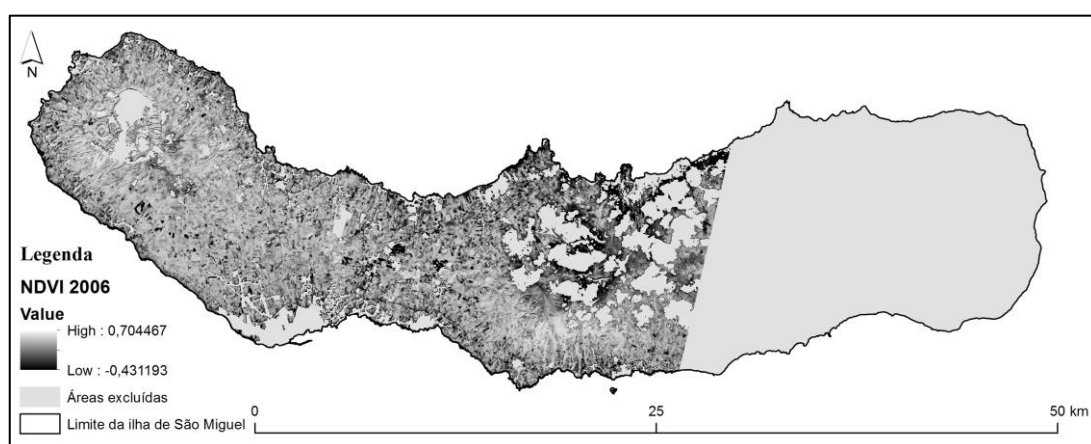


Figura 17 – Cálculo do NDVI para 2006.

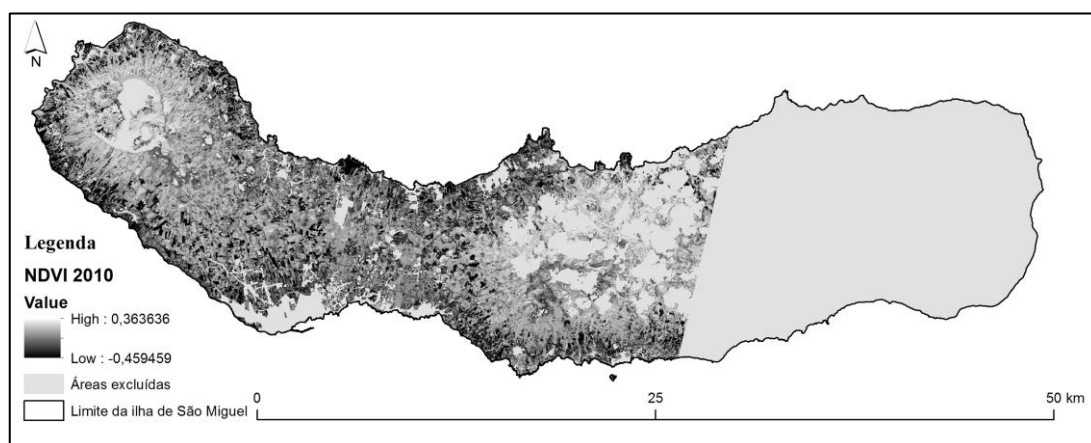


Figura 18 – Cálculo do NDVI para 2010.

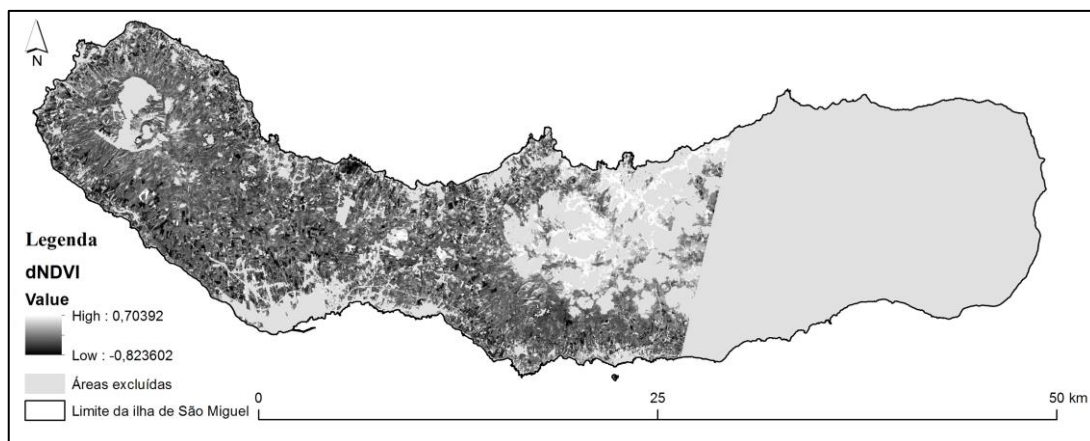


Figura 19 – Cálculo da diferença de NDVIs entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006.

Após o cálculo da imagem de diferença de NDVIs foram aplicados diferentes valores de limiar. Foram efetuadas todas as combinações possíveis com os valores de coeficiente com o objetivo de identificar quais os valores de limiar mais adequados para a extração do decréscimo e do crescimento da vegetação, separadamente (Anexo 2). Através das diferentes imagens obtidas, os limiares que melhor realçaram as diferentes alterações pretendidas foram calculados através dos valores de coeficiente de 1,75 para o decréscimo da vegetação e de 1,50 para o crescimento da vegetação. Com estes valores de limiar diferentes, conseguiu-se fazer sobressair as áreas que sofreram decréscimo de vegetação, enquanto as áreas de crescimento de vegetação são ligeiramente menos realçadas. Assim, as áreas de decréscimo de vegetação foram codificadas com o número 1, as áreas onde ocorreu crescimento da vegetação codificaram-se com número 2 e as áreas onde não se verificou nenhuma alteração da vegetação foram identificadas com o número 0.

De uma forma geral, verificou-se que as alterações mais significativas ocorridas durante o espaço temporal estudado foram maioritariamente de crescimento da vegetação (Figura 20 e 21). Apesar de se registarem áreas onde ocorreu decréscimo da vegetação, estas surgem em menor número. No entanto, é de notar que as áreas representadas como crescimento de vegetação na zona da Lagoa do Fogo são, possivelmente, causadas pela existência de nuvens e de sombra na imagem de 2006, enquanto na imagem de 2010 o referido local não apresentava nuvens nem sombra provocadas por estas. Assim, como em 2006 essas áreas estavam influenciadas, maioritariamente, pela sombra das nuvens, apresentavam um valor de ND muito baixo (típico de uma área sem vegetação), enquanto na imagem de 2010 o valor de ND era alto (típico de uma área com vegetação), resultando, por isso, no aparente crescimento de vegetação. Este fato significa que o método de classificação ISODATA não extraiu corretamente todas as nuvens e suas sombras.

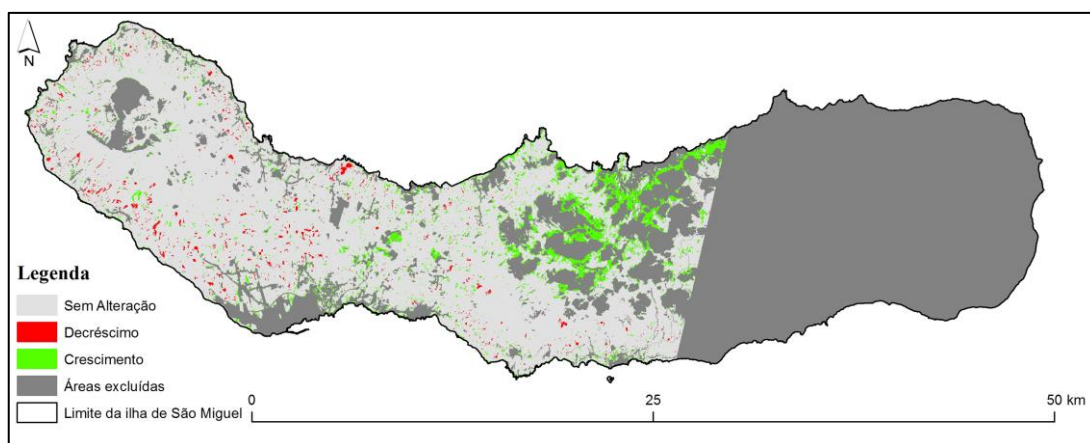


Figura 20 – Aplicação de um coeficiente de 1,75 para as áreas de decréscimo e de um coeficiente de 1,50 para as áreas de crescimento de vegetação.

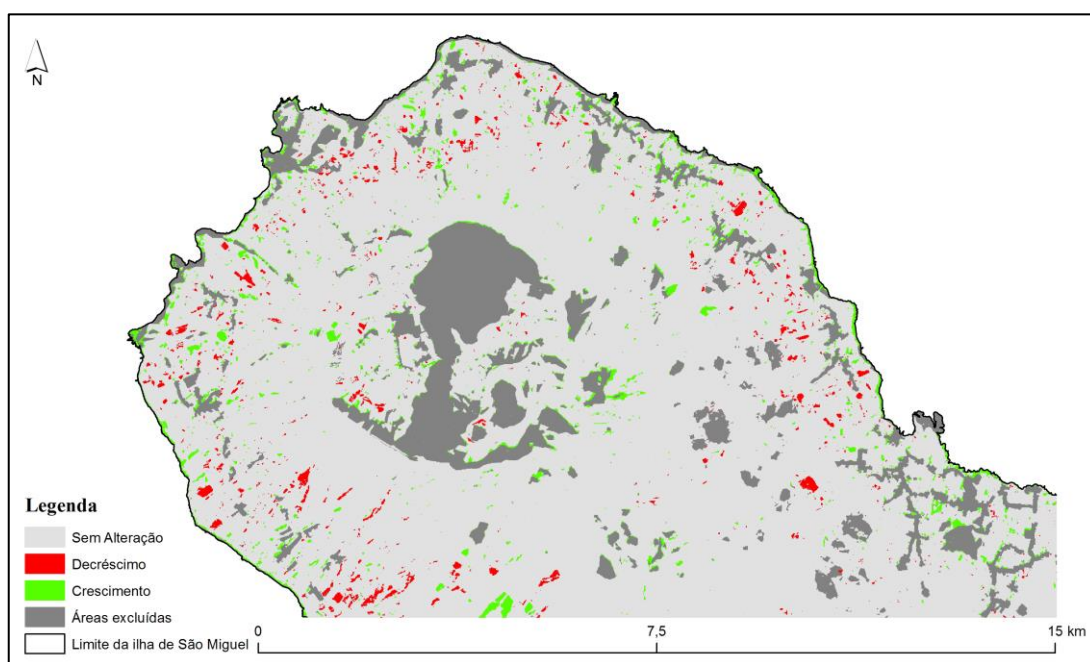


Figura 21 – Pormenor da aplicação dos diferentes valores de limiar, na zona das Sete Cidades.

Através dos resultados obtidos é possível verificarem-se, relativamente ao IFRAA, as áreas onde ocorreram alterações e as áreas onde isso não aconteceu. No entanto, ao se observar um mapa como o obtido, permanece complicada a tarefa das equipas de campo, uma vez que os resultados necessitam, ainda, de serem trabalhados no sentido de facilitar a compreensão dos mesmos. É necessário comparar os resultados obtidos através da aplicação dos diferentes valores de limiar com as imagens de satélite originais, com as imagens de NDVI para os diferentes anos e com a imagem de diferença de NDVIs. Esta comparação auxilia a identificação de possíveis áreas que estejam identificadas erroneamente, como é o caso das

áreas de crescimento de vegetação, já referidas, na zona da Lagoa do Fogo. Caso essa comparação não fosse realizada, estar-se-ia a interpretar resultados errados, pois, na realidade, as áreas referidas não correspondem a um crescimento de vegetação.

Nas figuras seguintes pode-se observar a comparação entre os resultados obtidos através da aplicação dos valores de limiar e as imagens de satélite originais, de 2006 e de 2010, na composição RGB 123 e a imagem de diferença de NDVIs. Na Figura 22 é possível comprovar a existência de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. Este fato é comprovado pelas áreas delimitadas a vermelho e a verde, correspondendo a decréscimo e crescimento da vegetação, respetivamente. Nas imagens de satélite com a composição RGB 123, os pixéis de cor vermelha significam presença de vegetação, enquanto os pixéis que apresentam qualquer outra cor demonstram a ausência de vegetação. Pela análise visual das imagens de satélite é possível encontrar alterações ocorridas na vegetação, tanto de decréscimo como de crescimento. Tal é comprovado pela imagem de diferença de NDVIs, onde os pixéis escuros correspondem a decréscimo e os claros a crescimento da vegetação. De seguida, na imagem onde se aplicaram os valores de limiar, verificam-se as áreas onde as alterações na vegetação foram mais significativas.

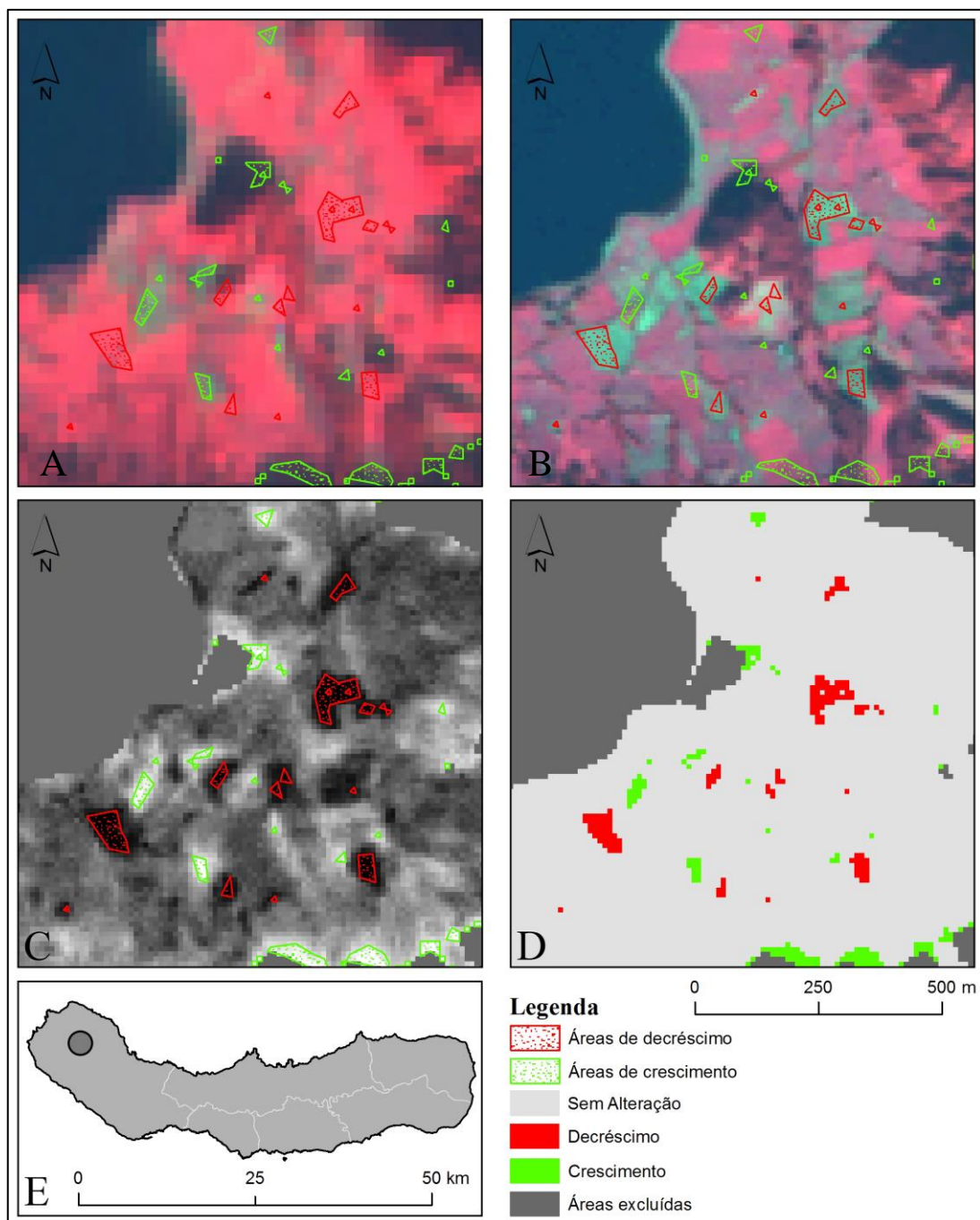


Figura 22 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação; E – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.

Na Figura 23 representam-se imagens com as mesmas características da figura anterior mas exemplifica-se uma área de dimensão considerável onde se pode verificar decréscimo da vegetação.

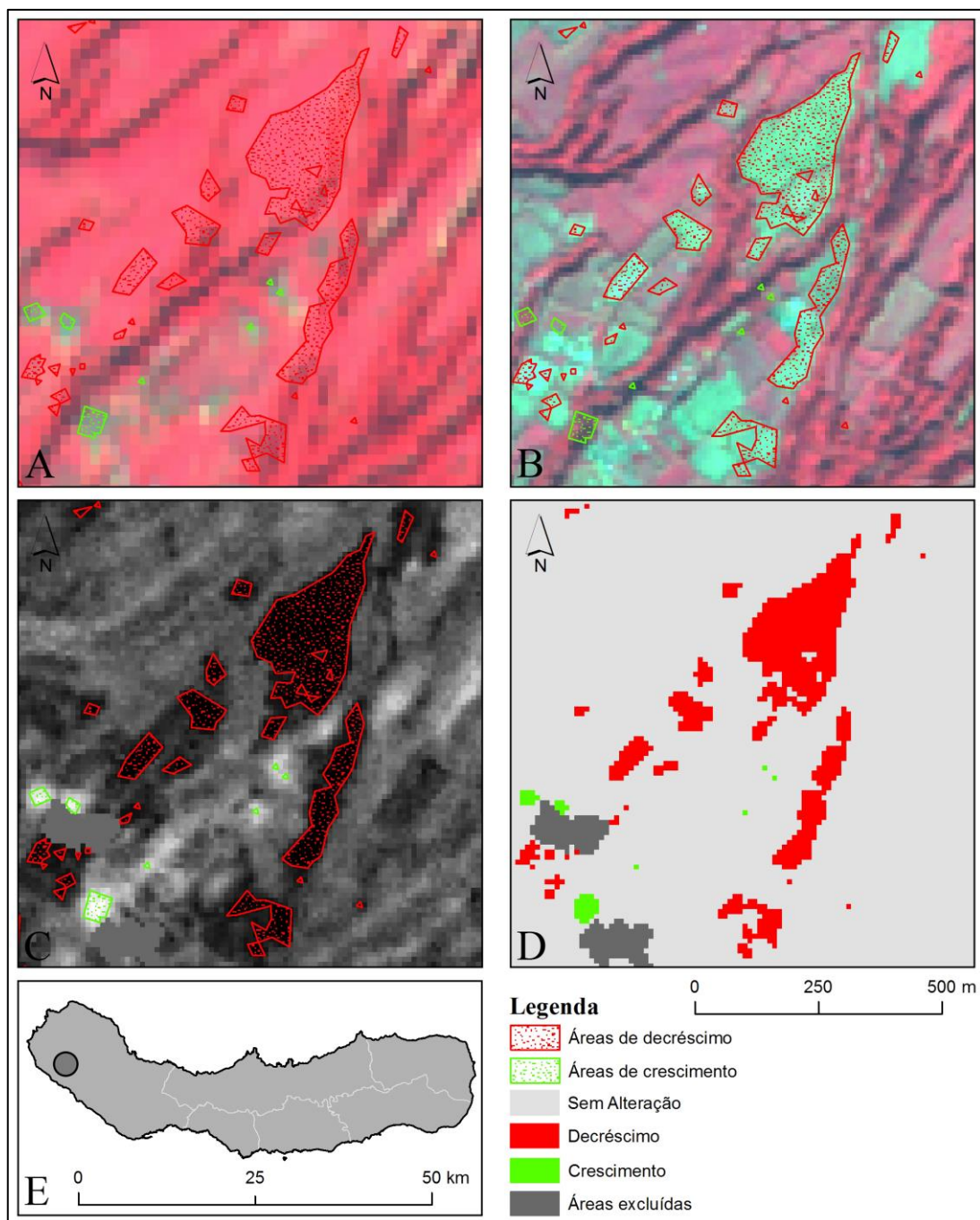


Figura 23 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação; E – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.

De seguida, na Figura 24, exemplifica-se outro local da ilha de São Miguel onde se verificaram alterações da vegetação, tanto de decréscimo como de crescimento.

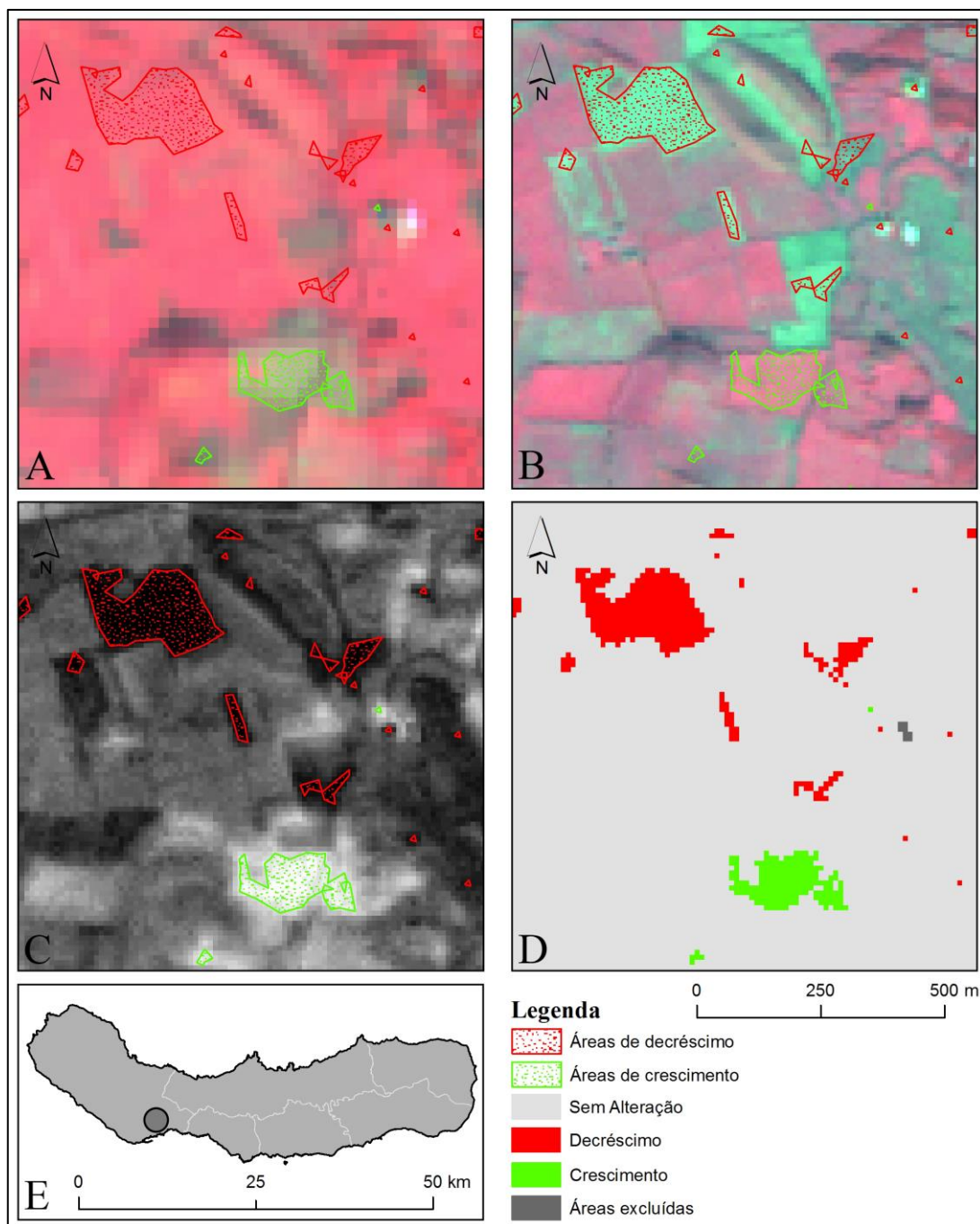


Figura 24 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação; E – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.

Um dos passos inerentes ao tratamento dos resultados passa pela alteração da UMC. No presente caso, esta alteração foi realizada de modo a que a UMC passasse a ser 4ha, ou seja, todos os polígonos resultantes da aplicação dos diferentes valores de limiar com uma área inferior a esta área foram eliminados. Com esta operação, foi possível fazer sobressair todas

as alterações (decréscimo ou crescimento de vegetação) que apresentam uma área relevante de serem estudadas mais detalhadamente.

Seguidamente, uma operação de igual importância foi a remoção das áreas que foram identificadas, pelo respetivo valor de limiar, de forma errada, resultando num mapa simples e de fácil interpretação (Figura 25).

Através do mapa resultante verifica-se que o crescimento da vegetação foi a alteração da vegetação que mais se sobressaiu, apresentando uma área igual ou superior a 4ha. Este fato é comprovado pelos 146,90ha de área onde houve aumento de vegetação relativamente aos 84,69ha onde ocorreu decréscimo de vegetação. Assim, comparativamente à área total da ilha de São Miguel, no espaço temporal estudado verifica-se que 0,20% das alterações ocorridas foram de crescimento de vegetação, enquanto 0,11% foram de decréscimo.

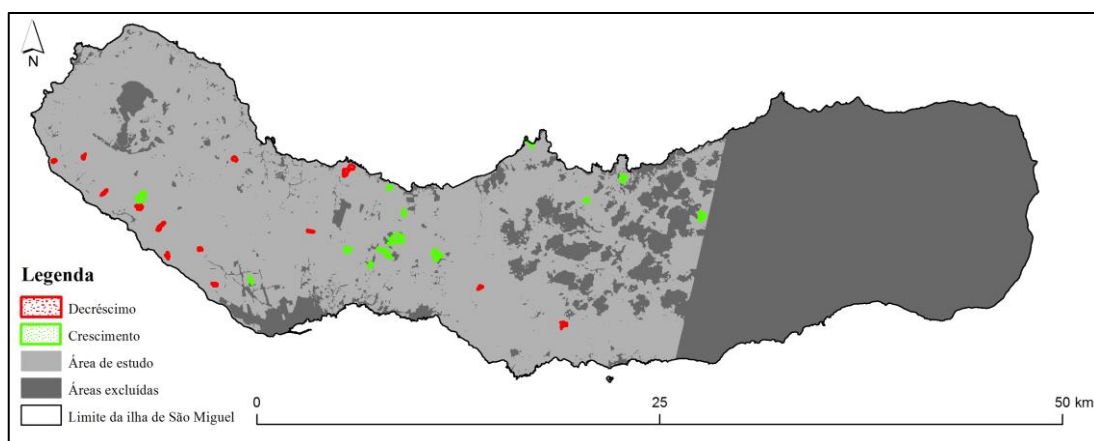


Figura 25 – Identificação das alterações tanto de decréscimo como de crescimento de vegetação que apresentam uma área igual ou superior a 4ha.

A etapa seguinte baseou-se na sobreposição das áreas obtidas no IFRAA. Desta forma, foi possível identificar quais as categorias do IFRAA que sofreram alterações na vegetação. Todo o trabalho realizado culminou nesta fase, avaliando-se a necessidade da deslocação das equipas de campo a todas as áreas ou apenas a algumas. Por exemplo, as alterações ocorridas na categoria Espaços florestais ou nos Espaços naturais ou semi-naturais, têm de ser analisadas com maior atenção do que as alterações nas Culturas agrícolas ou pastagens, sendo possível estabelecer prioridades de deslocações *in situ*. Assim, através da Figura 26 e 27 demonstra-se a sobreposição das alterações detetadas no IFRAA da área de estudo durante o período analisado, relativamente ao uso do solo e dos povoamentos florestais, respetivamente.

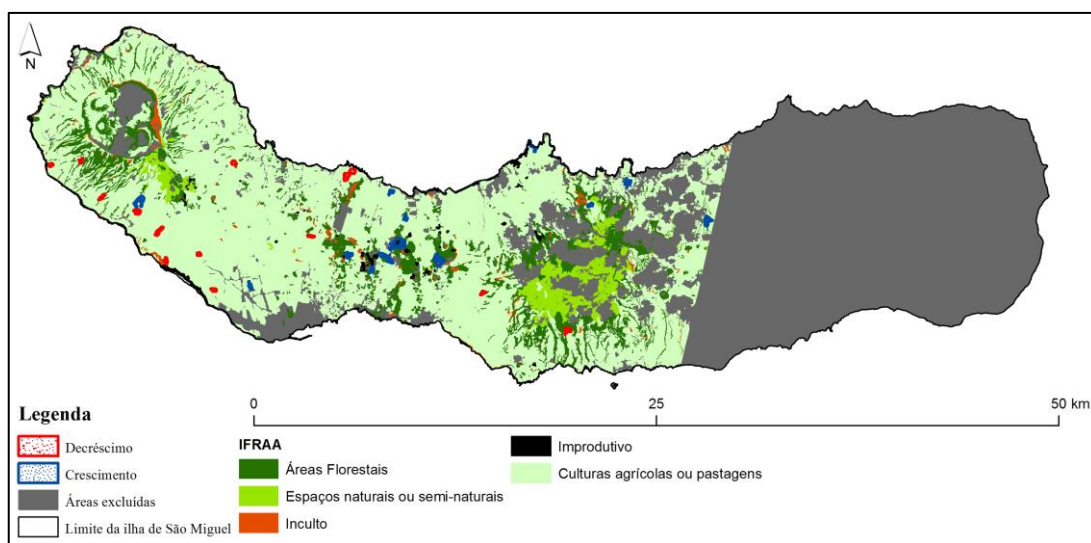


Figura 26 – Alterações ocorridas no IFRAA durante o período de estudo.

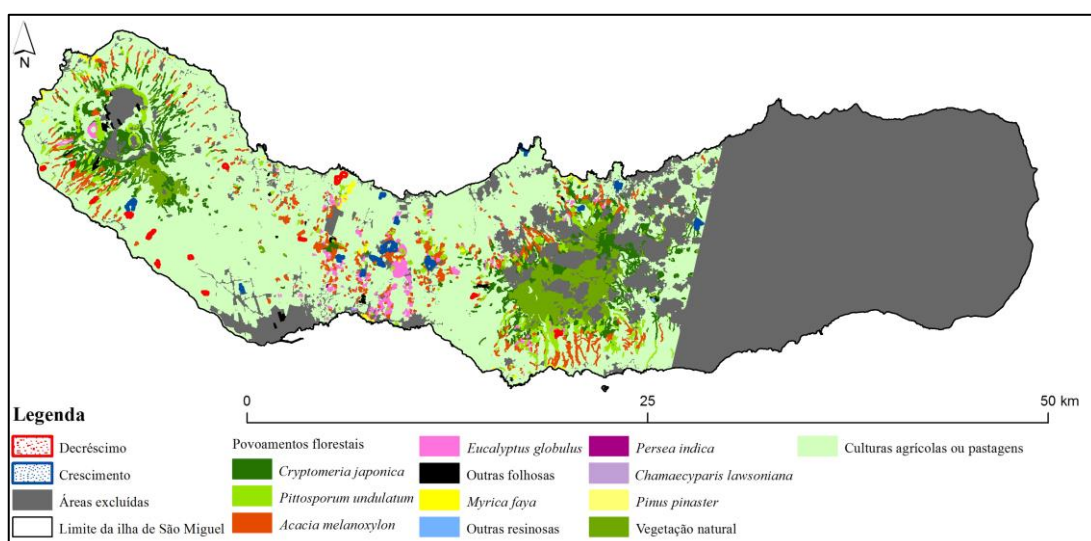


Figura 27 – Alterações detetadas nos povoamentos florestais durante o período de estudo.

Analisando os resultados em pormenor, verifica-se que as alterações de vegetação detetadas aconteceram nas várias categorias do IFRAA, à exceção dos Espaços naturais ou semi-naturais. Como foi possível verificar, as alterações ocorridas no coberto vegetal remetem, maioritariamente, para o crescimento de vegetação. Presentes nas diversas categorias do IFRAA, destacou-se um episódio de crescimento de vegetação na zona central da ilha de São Miguel em áreas classificadas como Improdutivas e Espaços florestais.

Para além destas alterações correspondentes ao crescimento de vegetação, no presente trabalho também foram detetadas áreas de decréscimo de vegetação. Estas áreas localizam-

se, na sua maioria, também, nas Culturas agrícolas ou pastagens. No entanto, importa evidenciar que ocorreu decréscimo de vegetação numa área classificada como Espaços florestais, sendo a única em toda a área de estudo.

Seguindo o raciocínio anterior, nas figuras que se seguem observam-se as áreas com dimensão igual ou superior a 4ha onde foram detetadas alterações na vegetação. Realiza-se a comparação das referidas áreas entre as imagens de satélite originais, de 2006 e de 2010, na composição RGB 123 e a imagem de diferença de NDVIs.

Na Figura 28 apresentam-se duas áreas onde ocorreu decréscimo da vegetação. Com a sobreposição dessas áreas com o uso do solo e os povoamentos florestais verifica-se que essas alterações referem-se a áreas de Culturas agrícolas ou pastagens. De seguida, a Figura 29 demonstra duas áreas onde ocorreu decréscimo e crescimento da vegetação. Relativamente à área de decréscimo, pode-se verificar através da sobreposição com o uso do solo e os povoamentos florestais que se refere a Culturas agrícolas ou pastagens. Quanto à área relativa ao crescimento de vegetação, esta insere-se, no uso do solo do IFRAA, nas categorias Culturas agrícolas ou pastagens e nas Áreas florestais. Relativamente aos povoamentos florestais verifica-se que a área correspondente às Áreas florestais pertence a um povoamento de *Acacia melanoxylon*. Por fim, na Figura 30 expõe-se um exemplo de uma área onde a alteração detetada se refere ao crescimento da vegetação. Esta área, quando sobreposta com o uso do solo do IFRAA, está inserida nas categorias Culturas agrícolas ou pastagens e nas Áreas florestais. Ao se sobrepor com os povoamentos florestais do IFRAA pode-se observar que a área correspondente às Áreas florestais no uso do solo refere-se a uma área de um povoamento de *Eucalyptus globulus*.

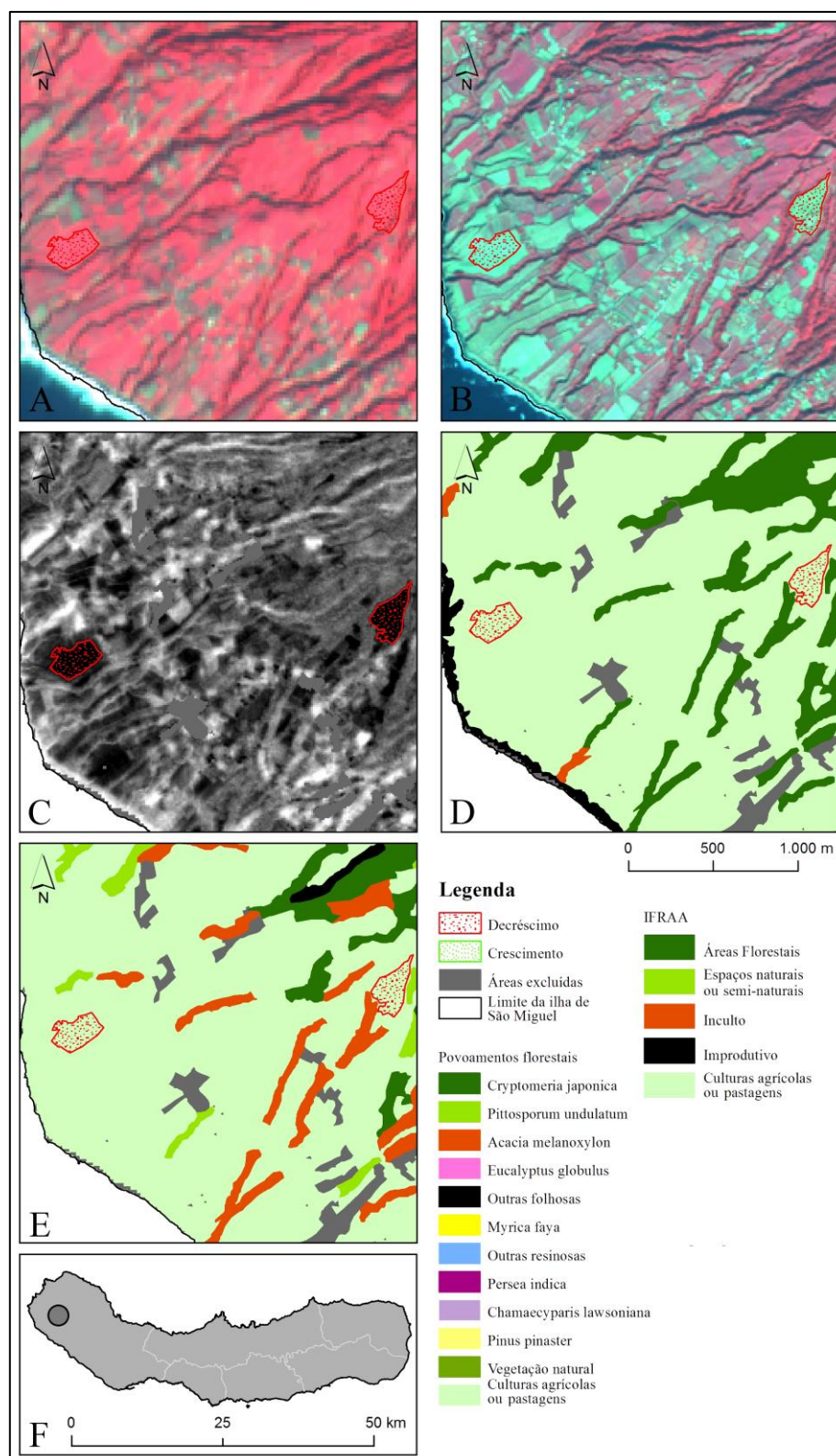


Figura 28 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.

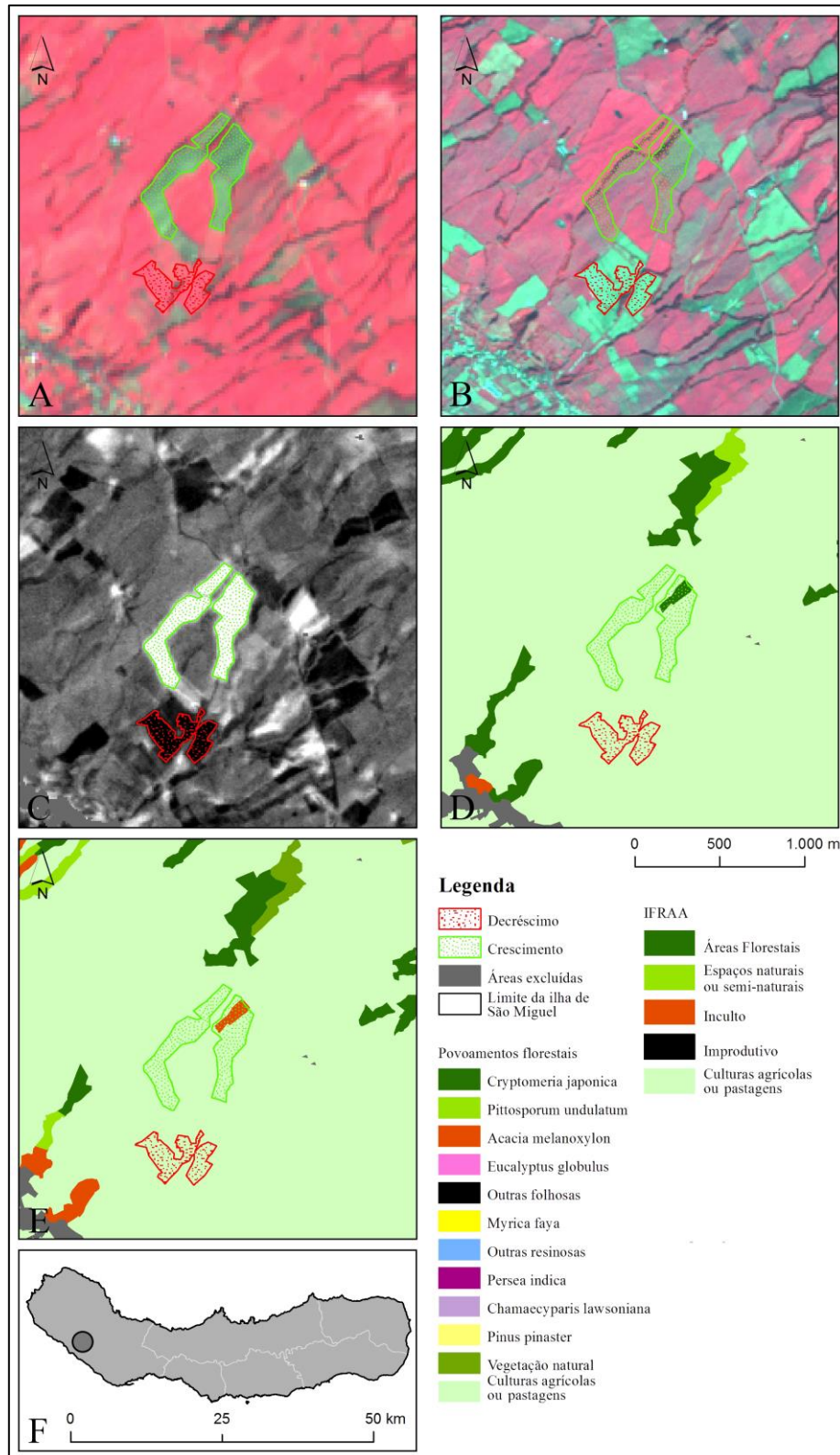


Figura 29 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos

povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel vegetação no IFRAA.

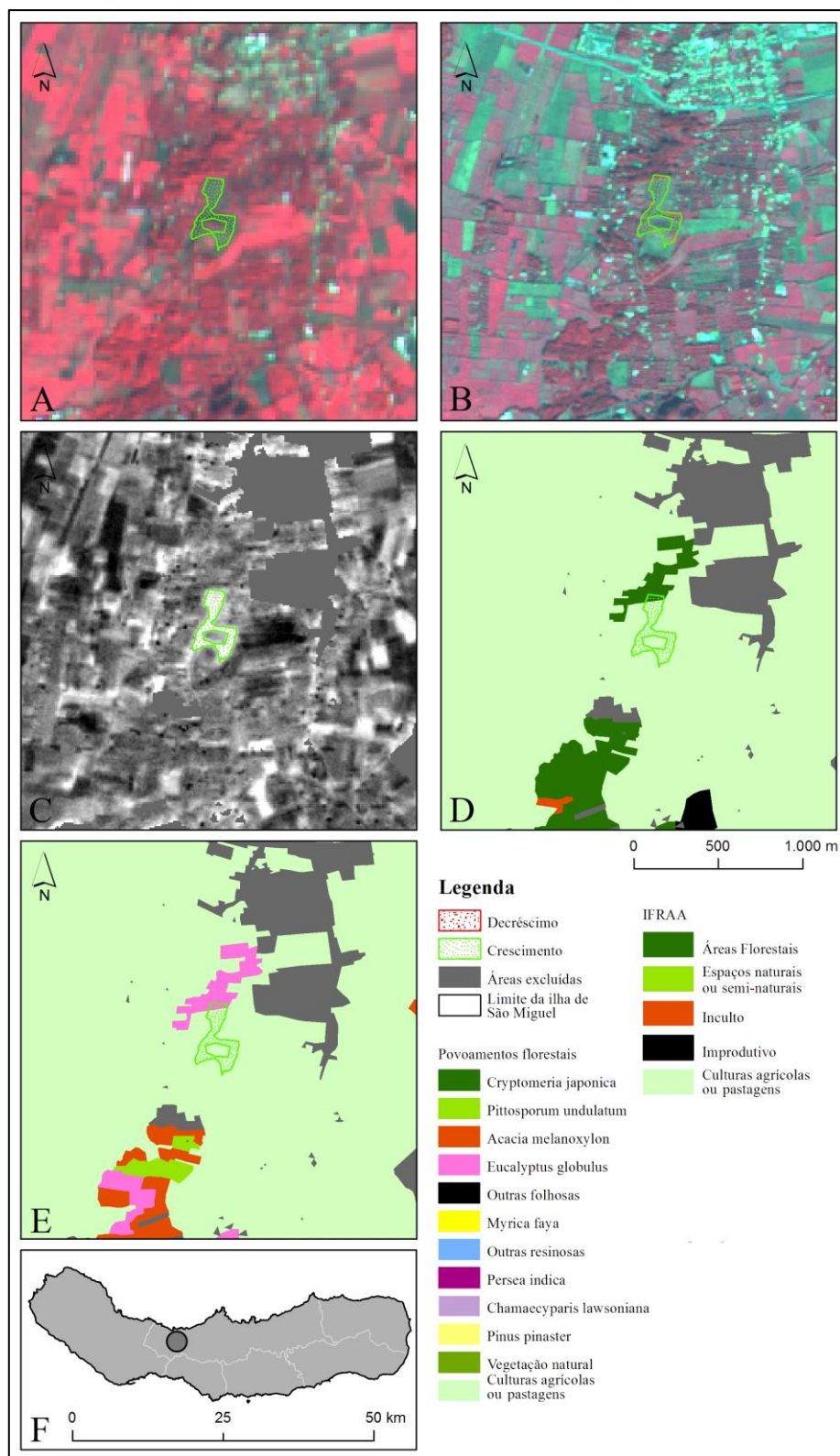


Figura 30 – Exemplo de alterações ocorridas entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123;

C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.

4.2. Discussão dos resultados obtidos

Uma imagem vale por mil palavras. Com os resultados obtidos pôde-se confirmar este fato, acrescentando que uma imagem de satélite não corresponde apenas a palavras, mas também, e principalmente, a dados. Através da metodologia apresentada foi possível extrair informação sobre as características da vegetação presente nas imagens de satélite e localizar as áreas onde ocorreram eventos de decréscimo e de crescimento de vegetação na ilha de São Miguel.

De uma forma geral, São Miguel é uma ilha com enormes extensões de vegetação. Como tal, o Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores é uma ferramenta importante para a sua monitorização. Com os resultados obtidos e a sua sobreposição no IFRAA, verificou-se que a maioria das alterações ocorreu em áreas correspondentes a Culturas agrícolas e pastagens. Isto resulta das circunstâncias de existir na área de estudo o costume da prática da agricultura e da criação de animais, onde os terrenos são utilizados ao longo de todo o ano para esse fim.

Relativamente às áreas de decréscimo de vegetação nos Espaços florestais, os resultados foram escassos, ou seja, não ocorreram muitos cortes de árvores, pelo menos em áreas iguais ou superiores a 4ha. Foi detetada apenas uma área com cerca de 7,47ha, correspondente a *Eucalyptus globulus*, na zona da Lagoa do Fogo onde ocorreu decréscimo da vegetação (Figura 31).

Ao ser detetada uma alteração desta categoria, é essencial averiguar se existe licença de corte e se, em caso afirmativo, a área de corte proposta na licença foi respeitada. Como se pôde verificar anteriormente, as alterações possíveis de ocorrer no coberto florestal do IFRAA são uma preocupação para as entidades responsáveis pela manutenção da floresta da RAA. Para a aquisição da respetiva licença, os requerentes necessitam de preencher um requerimento disponibilizado pela DRRF (DRRF, 2012). A informação para completar este documento varia dependendo do que o requerente pretende, mas é de referir a necessidade de se indicar a localização da propriedade, a área abrangida pelo corte, a espécie a cortar (nome científico e vulgar), a quantidade de exemplares, a natureza do corte, a que se destina o corte e qual a cultura prevista no terreno após o corte (reflorestar, cultura agrícola, pastagem ou outro fim). Uma vez que existe muita informação sobre as alterações que ocorrem no IFRAA, o

cruzamento desta informação com os dados obtidos deverá ser apurado se, por exemplo, os espécimes a plantar correspondem à mesma categoria do IFRAA que existia antes do corte. Caso exista alteração na categoria, esta deverá ser atualizada no IRFAA.

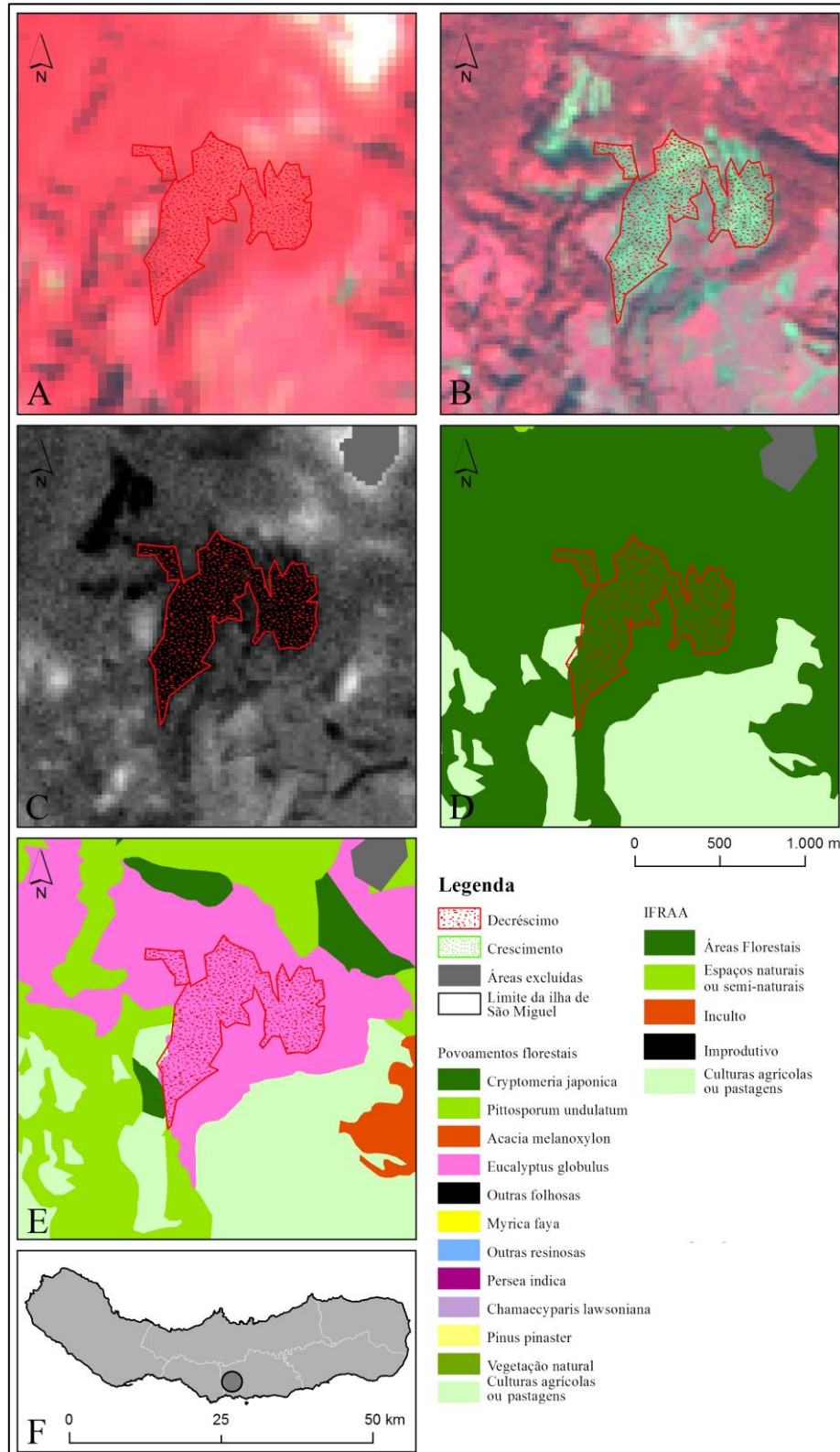


Figura 31 – Exemplo de uma área igual ou superior a 4ha que sofreu decréscimo de vegetação. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel vegetação.

Por fim, através da avaliação do mapa final é possível verificar que 79% das alterações ocorridas pertenciam realmente a áreas de vegetação, enquanto 21% foram detetadas em áreas que não possuíam vegetação, correspondendo a alterações erradas. Importa ainda referir que as alterações correspondentes a decréscimo de vegetação foram todas detetadas corretamente. No entanto, as áreas detetadas como crescimento da vegetação evidenciaram maior confusão, onde apenas 60% das alterações foram corretamente identificadas (Tabela 10). A partir destes resultados, é importante mencionar que quando aplicada a presente metodologia é necessário ter em atenção as áreas que correspondem a crescimento de vegetação, sendo sempre importante avaliar os resultados obtidos.

Percentagem			
	Decréscimo	Crescimento	Total
Correto	100%	60%	79%
Errado	0%	40%	21%
Total	100%	100%	100%

Tabela 10 – Avaliação do mapa final por interpretação visual.

Um exemplo de uma área detetada erradamente como de crescimento de vegetação é apresentado na Figura 32. Como se pode verificar pela imagem de satélite de 2010, a área detetada como crescimento de vegetação corresponde, na sua maior parte, a edificações, não apresentando pixéis de cor vermelha (caraterísticos da presença de vegetação). Como se pode verificar pela carta de uso do solo do IFRAA, nessa mesma área também se encontra vegetação (Culturas agrícolas ou pastagens, Áreas florestais e Improdutivo). Relativamente aos povoamentos florestais do IFRAA, as referidas áreas referem-se às Culturas agrícolas ou pastagens e a povoamentos de *Acacia melanoxylon*. Através da análise de imagens do Google Earth (Google, 2011) foi possível averiguar que a área em questão corresponde a uma exploração de inertes (Figura 33).

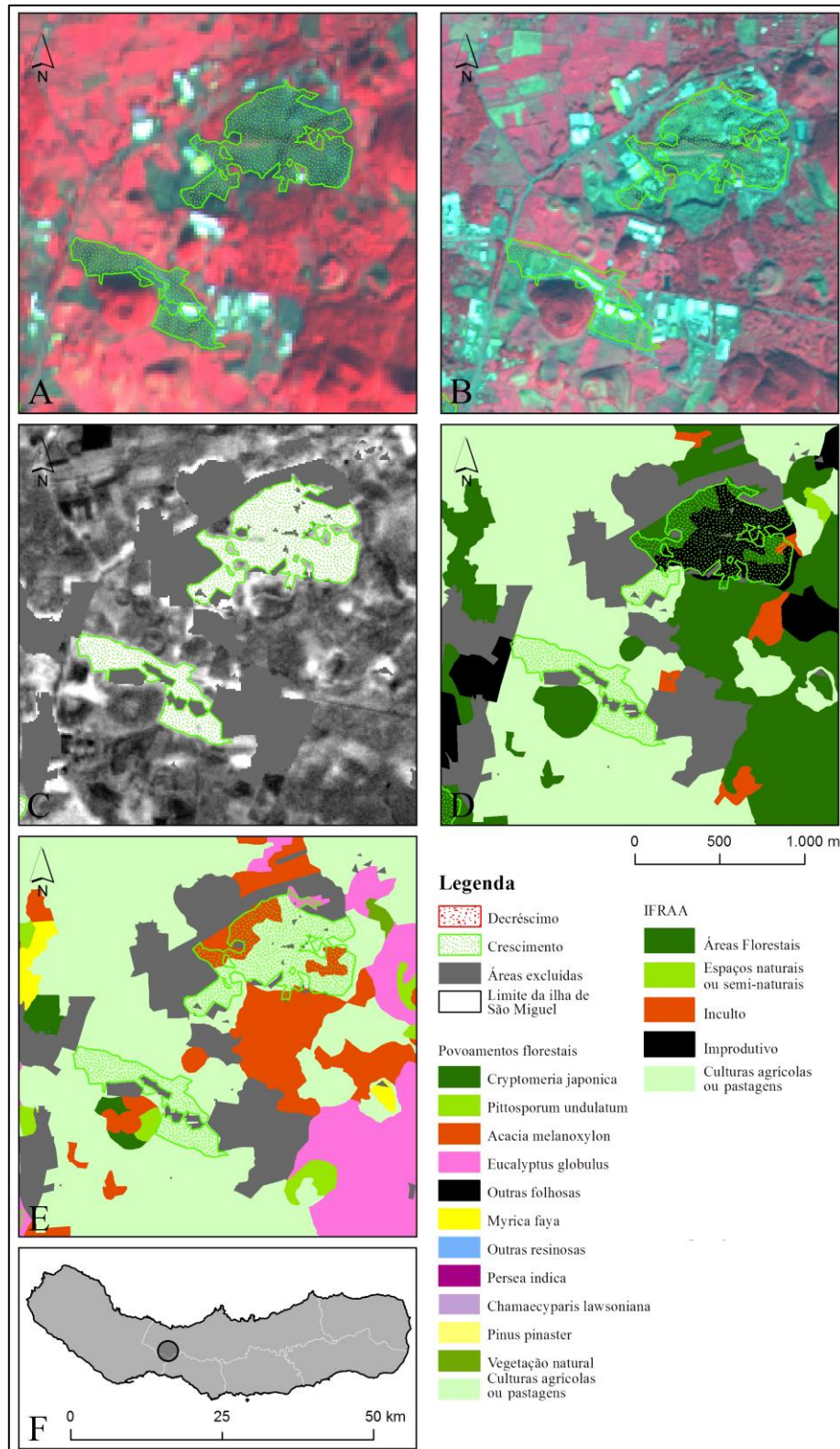


Figura 32 – Exemplo de alteração detetada erradamente entre 2006 e 2010 com área igual ou superior a 4ha. A – Imagem do satélite SPOT 4 de 2006, composição RGB 123; B – Imagem do satélite SPOT 5 de 2010, composição RGB 123; C – Imagem de diferença de NDVIs, entre o NDVI de 2010 e o NDVI de 2006; D – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de crescimento da vegetação no uso do solo do IFRAA; E – Aplicação do coeficiente 1,75 para as áreas de decréscimo e 1,50 para as áreas de

crescimento da vegetação nos povoamentos florestais do IFRAA; F – Localização do presente exemplo na ilha de São Miguel.



Figura 33 – Exemplo de uma área detetada erradamente como crescimento da vegetação que corresponde a uma exploração de inertes.

Perante os resultados obtidos, são de realçar os proveitos da utilização de imagens de satélite para estudos multi-temporais sobre as características da vegetação. Com apenas duas imagens de satélite de diferentes datas foi possível avaliar estas características para a ilha de São Miguel (quase na totalidade). Desta forma, reduziu-se a probabilidade da ocorrência de erros geométricos e radiométricos, o que poderia não acontecer caso tivessem sido utilizadas várias imagens de satélite.

Como se pôde também verificar, o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada em conjunto com a aplicação de diferentes valores de limiares foi uma metodologia que apresentou bons resultados. Desta forma, com esta metodologia foi possível detetar as alterações ocorridas no período de estudo e extraí-las para um mapa de simples interpretação. Assim, através desta metodologia foi exequível passar de um mapa onde o valor do pixel varia de -1 a 1 para um mapa com apenas três valores de pixel (0 – áreas sem alteração; 1- áreas de decréscimo; 2 – áreas de crescimento), capacitando uma leitura simplificada e mais fidedigna.

Como foi referido, foi possível detetar alterações no uso do solo do IFRAA através da metodologia aplicada. No entanto, existe um aspeto importante que requer atenção. Os resultados advêm de duas imagens de satélite que se encontram separadas temporalmente por

4 anos. Este é um intervalo de tempo consideravelmente grande para identificar todas as alterações ocorridas durante esse período de tempo. Um exemplo desse desfasamento é a possibilidade de, por exemplo, no dia seguinte à captação da imagem mais antiga determinada área ter sofrido um corte e imediatamente a seguir ter sido replantada. Assim, esta alteração no coberto florestal não seria detetada pela imagem de 2010, pois os espécimes já teriam tido tempo para crescer e as suas características espectrais já se assemelhariam com áreas de vegetação que não sofreram nenhum corte. Por outro lado, ao ser realizado um corte e uma nova plantação entre esses dois espaços temporais, existe a possibilidade de a categoria plantada ser distinta da existente anteriormente e essa alteração de categoria não ser identificada na imagem de 2010.

5. Conclusão

5.1 Perspetivas futuras

O trabalho desenvolvido pretende, por um lado, demonstrar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida e, por outro lado, ser um contributo para o desenvolvimento de novos estudos na área da deteção remota no Arquipélago dos Açores. Importa referir que a metodologia aqui apresentada não se restringe apenas a esta região, podendo ser aplicada, igualmente, em outras áreas de estudo.

De modo a aperfeiçoar a fiabilidade dos resultados obtidos, seria importante utilizar imagens de satélites cujo distanciamento temporal entre ambas fosse mais reduzido, não ultrapassando, por exemplo, dois anos entre a captação de cada uma das imagens. Desta forma, reduzir-se-ia a possibilidade de ter ocorrido entre os dois espaços temporais alterações no coberto vegetal, como é o caso de cortes e novas plantações. Para além disso, a credibilidade dos resultados obtidos poderia ainda aumentar se fossem utilizadas imagens captadas pelo mesmo tipo de satélite, sendo o SPOT 5 um satélite de eleição para este tipo de estudos. Importa referir, também, que num próximo estudo quando se criarem as máscaras de exclusão se incluía a categoria Improdutivo do IFRAA nessas máscaras de modo se retirarem essas áreas da área de estudo.

Seria, igualmente, proveitoso complementar este trabalho com o cruzamento de informação referente aos pedidos e licenças de cortes de arvoredo. Desta forma, poder-se-ia avaliar se as licenças de corte estão a ser cumpridas ou se estão a ocorrer cortes ilegais. Neste âmbito, a atualização do IFRAA estaria a funcionar, também, como uma ferramenta de controlo e fiscalização da floresta.

É de realçar que estas imagens são uma enorme fonte de informação acerca do território dos Açores. Por isso, seria benéfico alargar a utilização destas a outras áreas, podendo ser úteis, por exemplo, para a gestão, monitorização e avaliação dos vários Instrumentos de Gestão Territorial.

5.2 Considerações finais

O interesse pelas florestas estende-se muito para além das inúmeras utilizações antropogénicas, conseguindo estas um lugar de extrema importância na sobrevivência de todo o nosso planeta. Essencial à vida humana, a floresta foi considerada durante muito tempo um recurso inesgotável, visão que se foi alterando à medida que a população foi crescendo incansavelmente até atingir os números exorbitantes da atualidade. Para o Homem, a floresta apresenta diversos tipos de recursos que não podem deixar de se ter em conta. Por um lado, a floresta é convertida em terrenos de cultivo e de pastagem, por outro é transformada em espécies adaptadas para a produção de madeira, papel, entre outros fins. O aumento da população e, consequentemente, o crescimento exponencial da utilização dos recursos naturais poderão ter colocado as florestas numa posição de risco.

Numa sociedade em constante evolução, a existência de uma floresta saudável é uma mais-valia para o bem-estar tanto do Homem como do próprio planeta Terra. Atualmente, no mundo industrializado em que vivemos, o equilíbrio entre esses dois aspetos apresenta-se como um cenário difícil de alcançar. No entanto, em simultâneo, têm sido realizados vários esforços para a consciencialização sobre a importância da floresta.

Este panorama leva à extrema necessidade de existir um instrumento de gestão e ordenamento do coberto florestal para a obtenção de uma floresta sustentável e equilibrada, tornando possível a existência de áreas de proteção e de áreas reservadas para a produção florestal. O Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores, englobando todos os aspetos acima referidos, apresenta-se como uma ferramenta de extrema utilidade para a Região.

Aliadas a esta preocupação, as novas tecnologias têm-se apresentado como instrumento essencial para o estudo, avaliação e monitorização do coberto florestal. A deteção remota e os sistemas de informação geográfica têm-se revelado essenciais para estes estudos. A tecnologia e os métodos adotados por estas ciências têm evoluído significativamente, apresentando, atualmente, um vasto rol de aplicações nos estudos de vegetação.

O uso da detecção remota como auxílio na construção de um inventário florestal tem vindo a demonstrar grande utilidade para a produção de cartografia automática a diversas escalas: local, regional, nacional e até global. Ao mesmo tempo, através da detecção remota é possível identificar os diferentes tipos de uso do solo/coberto do solo e criar um histórico de determinado local. Por sua vez, essa informação recolhida pode ser utilizada para diversas pesquisas, como é exemplo o estudo de identificação de alterações que ocorrem no coberto florestal, visto este não ser estático.

As imagens de satélite providenciam uma vasta gama de informação. Por esta razão, estas imagens têm evidenciado diversas vantagens e aplicabilidades. Uma utilização cada vez mais frequente destas imagens está centralizada em estudos sobre a vegetação. As características das imagens de satélite proporcionam a extração de um leque variado de informação sobre a vegetação, como por exemplo, a identificação de diferentes tipos de coberto florestal.

Uma das características das imagens de satélite que se distingue é a captação de imagens do mesmo local ao longo dos anos. A partir destas, passa a ser possível a realização de estudos multi-temporais, como por exemplo, a detecção de alterações ocorridas no coberto florestal. Para a identificação e extração destas alterações têm sido desenvolvidos diversos métodos, sendo de evidenciar a aplicação de índices de vegetação, dos quais se pode distinguir o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada.

A monitorização das alterações que ao longo do tempo ocorrem no coberto florestal visa estudar a utilização desses recursos florestais de modo sustentável. No presente trabalho, foi apresentada uma metodologia que, a partir de imagens de satélite de diferentes anos, identificasse as alterações ocorridas no IFRAA, mais propriamente na ilha de São Miguel, de forma a ser possível uma atualização do mesmo caso fossem identificadas alterações na área de estudo.

A partir dos objetivos propostos para a concretização do presente trabalho, foi possível mostrar a utilidade da detecção remota em estudos de detecção de alterações do coberto florestal. Assim, neste estudo foi possível identificar alterações da vegetação, tanto de crescimento como de decréscimo, ocorridas no coberto florestal do IFRAA de São Miguel. Através da utilização do NDVI associado a diferentes valores de limiar, estas alterações foram realçadas resultando num mapa de fácil interpretação, com as categorias Sem alteração, Crescimento de vegetação e Decréscimo de vegetação. Após a sua sobreposição com o IFRAA, rapidamente tornaram-se visíveis os locais onde as alterações ocorreram. Desta forma, verificou-se que a metodologia aplicada mostrou-se eficaz, revelando que os

esforços das equipas de campo podem ser reduzidos. Assim, estas equipas só terão de se deslocar à área onde aconteceu decréscimo e crescimento da vegetação, o que proporciona redução de tempo e encargos por parte das entidades competentes.

Apesar de a metodologia evidenciar bons resultados, seria importante a realização do presente trabalho com imagens mais próximas temporalmente. Para além disso, seria proveitoso para a Região Autónoma dos Açores o alargamento do presente estudo às restantes ilhas do arquipélago. A monitorização e atualização do IFRAA mostra-se, assim, como um aliado ao desenvolvimento da Região, na medida em que se apresenta como uma ferramenta substancial à preservação da natureza do arquipélago, onde, devido à sua pequena dimensão, a ocorrência de alterações é mais perceptível. Desta forma, através da atualização periódica do IFRAA, este pode ser utilizado como uma ferramenta não só de apoio ao planeamento florestal, onde apresenta um importante relevo em relação aos recursos hídricos e aos declives acentuados dos terrenos, mas também, de preservação da natureza.

A partir do trabalho desenvolvido conclui-se que a deteção remota e os sistemas de informação geográfica são uma mais-valia para o desenvolvimento de trabalhos relacionados com a monitorização do coberto florestal. A interligação e a evolução destes dois sistemas proporcionam a criação de informação cada vez mais credível que, por um lado conduz ao alargamento do horizonte de informação acerca do planeta em que habitamos e, por outro lado, proporciona novas ambições e a delimitação de metas cada vez mais ambiciosas nesta área.

Referências bibliográficas

- Abdel-Monem, A., Fernandez, L., e Boone, G., 1975, K-Ar ages from the eastern Azores group (Santa Maria, São Miguel and the Formigas Islands). *Lithos*, **8**, 247-254.
- Amorim, F., Alves, M. M., Manaças, P., e Miranda, P., s.d., *Vacas leiteiras em pastoreio – Um modelo de agricultura sustentável* (URL: http://www.ideassonline.org/public/pdf/br_42_99.pdf, consulta em 02-08-2012)
- Astrium, 2012, Página de Astrium GeoInformation Services : Satellite maps & images - geospatial solutions (URL: <http://www.astrium-geo.com/>, consulta em 10-08-2012)
- Boyd, S., e Danson, M., 2005, Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography*, **1**, 1-26.
- Caetano, M., 2011, *Manual da cadeira Deteção Remota da Pós-Graduação e Mestrado em Ciência & Sistemas de Informação Geográfica*, ISEGI-UNL, Lisboa.

- CAOP, 2012, Página da Carta Administrativa Oficial de Portugal do Instituto Geográfico Português (URL: <http://www.igeo.pt/>, consulta em 20-03-2012).
- CCRS, 2007, *Fundamentals of Remote Sensing, A Canada Centre for Remote Sensing Tutorial*. Natural Resources Canada.
- Chavez, P., 1996, Image-based atmospheric corrections – Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **62**, 1025-1036.
- Chen, Z., Elvidge, C., e Groeneveld, D., 1999, Vegetation change detection using high spectral resolution vegetation indices. In *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Application*, editado por R.S. Lunetta e C. D. Elvidge (London: Taylor and Francis), pp. 181-190.
- Chovelon, P., 1982. *Évolution volcano tectonique des îles de Faial et de Pico, Archipel des Açores – Atlantique Nord*. Dissertação de doutoramento, Université Paris-Sud, Paris.
- Congalton, R., e Green, K., 2009, *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data – Principles and Practices* (2º ed.) (New York: CRC Press).
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., e Lambin, E., 2004, Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *Taylor & Francis*, **25**, 1565-1596.
- CVARG, 2012, Página do Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos da Universidade dos Açores (URL: <http://www.cvarg.azores.gov.pt/Paginas/home-cvarg.aspx>, consulta em 20-06-2012).
- Decreto Legislativo Regional n.º 26/2010/A. *D.R. I Série*, **62 (30-03-2010)**, 985-1025.
- Decreto Legislativo Regional n.º 6/1998/A. *D.R. I Série*, **17 (13-04-1998)**.
- Decreto Regulamentar Regional n.º 1/2006/A. *D.R. I-B Série*, **7 (10-01-2006)**, 198-220.
- Deshayes, M., Guyon, D., Jeanjean, H., Stach, N., Jolly, A., Hagolle, O., 2006, The contribution of remote sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. *Annales Forest Science*, **63**, 579-595.
- Dias, E., 2001, *Cadernos de Botânica 3 – Ecologia e classificação da vegetação natural dos Açores* (Angra do Heroísmo: Herbário da Universidade dos Açores).
- DRRF, 2012, Página da Direção Regional dos Recursos Florestais (URL: <http://www.azores.gov.pt/Portal/pt/entidades/sraf-drrf/textoImagem/Protec%C3%A7%C3%A3o+dos+Arvoredos.htm>, consultada em 20-09-2012).

- FAO, 2005, Página da Food and Agriculture Organization (URL: <http://www.fao.org/news/story/en/item/95180/icode/>, consulta em 3-12-2011).
- Franklin, E., 2001, *Remote Sensing for Sustainable Forest Management* (1ª ed.) (Florida: CRC Press LLC).
- Frutuoso, G., 1995, *Saudades da Terra - Livro IV* (Ponta Delgada: Instituto Cultural).
- Gadow, K., Pukkala, T., e Tomé, M., 2006, *Forest Inventory - Methodology and Applications* (Netherlands: Managing Forest Ecosystems).
- Gaussman, H., 1977, Reflectance of leaf components. *Remote Sensing of Environment*, **6**, 1-9.
- GMES-SCD, 2012, Página do Global Monitoring for Environment and Security – Space Component Data da European Space Agency (URL: <http://gmesdata.esa.int/web/gsc/home>, consulta em 08-01-2012).
- Gonçalves, P., 2005. *Cartografia multi-escala de alterações do coberto florestal com imagens de satélite*. Tese de mestrado, ISEGI-UNL, Lisboa.
- Google, 2011, Google Earth (Versão 6.1) [Software] (Mountain View, USA: Google Inc.).
- Huete, A., 1988, A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, **25**, 295-309.
- Huete, A., e Hui, Q., 1994, An error and sensitivity Analysis of the atmospheric and soil Correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 897-905.
- IFN, 2010, Página do Inventário Florestal Nacional do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (URL: <http://www.icnf.pt/florestas/ifn>, consulta em 05-02-2012).
- IFRAA, 2007, *Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores*, Direção Regional dos Recursos Florestais.
- IFRAM, 2008, *Relatório do 1º Inventário Florestal da Região Autónoma da Madeira*, Direção Regional de Florestas.
- INE, 2011, Página do Instituto Nacional de Estatística (URL: <http://www.ine.pt>, consulta em 20-06-2012).
- Jensen, J., 1996, *Introductory Digital Image Processing, A Remote sensing Perspective*. (2ª ed.) (New Jersey: Prentice-Hall).
- Jensen, J., 2000, *Remote sensing of the environment, an Earth resource perspective* (New Jersey: Prentice-Hall).

- Kaufman, Y., e Tanré, D., 1992, Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **30**, 261-270.
- Kohl, M., Magnussen, S., e Marchetti, M., 2006. *Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory* (New York: Tropical Forestry).
- Lillesand, T., e Kiefer, R., 1994, *Remote Sensing and Image Interpretation* (3º ed.) (New York: John Wiley & Sons).
- Lu, D., Mausel, Brondízio, E., e Moran, E., 2004, Change detection techniques. *Taylor & Francis*, **25**, 2365-2407.
- Martins, V., 2010, *Avaliação da vulnerabilidade socioecológica ao risco sísmico no concelho de Vila Franca do Campo (Açores)*. Tese de mestrado, ISEGI-UNL, Lisboa.
- Meneses, P., e Almeida, T., 2012, *Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto* (Brasília: UnB).
- Nelson, D., 2005, *Satellite Remote Sensing for Enhancing National Forest Inventory*. Dissertação de doutoramento, University of Minnesota.
- Nunes, A., 2007, *Detecção automática de alterações do coberto florestal com imagens de satélite de grande e muito grande resolução espacial*. Tese de mestrado, ISEGI-UNL, Lisboa.
- Nunes, J. C., Camacho, A., França, Z., Montesinos, F. G., Alves, M., Vieira, R., Velez, V., e Ortiz, E., 2006, Gravity anomalies and crustal signature of vulvano-tectonic structures of Pico Island (Azores). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **156**, 55-70.
- Pu, Ruiliang, Gong, Peng, Tian, Yong, Miao, Xin, Carruthers, Raymond, I., e Gerald, A. L., 2008, Using classification and NDVI differencing methods for monitoring sparse vegetation coverage: a case study of saltcedar in Nevada, USA, *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 3987-4011.
- Ribeiro, J., 2008, *A detecção remota no inventário florestal: análise das potencialidades da utilização das imagens de satélite*. Tese de mestrado, ISEGI-UNL.
- Rouse, J., Haas, R., Scheel, J., e Deering, D., 1973, Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In *Proceedings of the Third ERTS Symposium*, pp. 309-317.
- Santos, T., Caetano, M., Barbosa, P., e Paúl, J., 1999, A comparative study of vegetation indices to assess land cover change after forest fires. In *Proceedings of SPIE, Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications* (Florence: The International Society for Optical Engineering), pp. 232-240.

- SIARAM, 2012, Página de Sentir e Interpretar o Ambiente dos Açores Através de Recursos Auxiliares Multimédia da Secretaria Regional do Ambiente e do Mar do Governo Regional dos Açores (URL: <http://siaram.azores.gov.pt/intro.html>, consulta em 28-07-2012).
- SIG-SRAF, 2007, Página do Sistema de Informação Geográfica da Secretaria Regional da Agricultura e Florestas (URL: <http://sigsraf.azores.gov.pt/>, consulta em 21-06-2012).
- Singh, A., 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 989-1003.
- Soares, A., e Pereira, L., 2002, *Avalização de recursos florestais utilizando imagens de satélite*. Artigo publicado nos Dossiers Especiais da Edição do Expresso, 1540. 12-14 (Lisboa: AFLOPS).
- SPEA, 2010, Página do Projeto LIFE+ Laurissilva Sustentável da Sociedade Portuguesa para o Estudo das Aves (URL: <http://life-laurissilva.spea.pt/pt/>, consulta em 10-06-2012).
- Tan, K., Lim, H., MatJafri, M., e Abdullah, K., 2011, A comparison of radiometric correction techniques in the evaluation of the relationship between LST and NDVI in Landsat imagery. *Environ Monit Assess*, **184**, 3813-3829.
- Thanapura, P., Helder, D., Burckard, S., Warmath, E., O'Neil, M., e Galster, D., 2007, Mapping urban and cover using QuickBird NDVI and GIS spatial modeling for Runoff coefficient determination. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **73**. 57-65.
- UN, 2011, Página da United Nations International Year of Forests (URL: <http://www.un.org/en/events/iyof2011/> consulta em 24-04-2012).
- Weier, L., e Herring, D., 2001, *Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*, (URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>, consulta em 25-08-2012).

Anexos

Anexo 1 – Dados do Inventário Florestal da Região Autónoma dos Açores

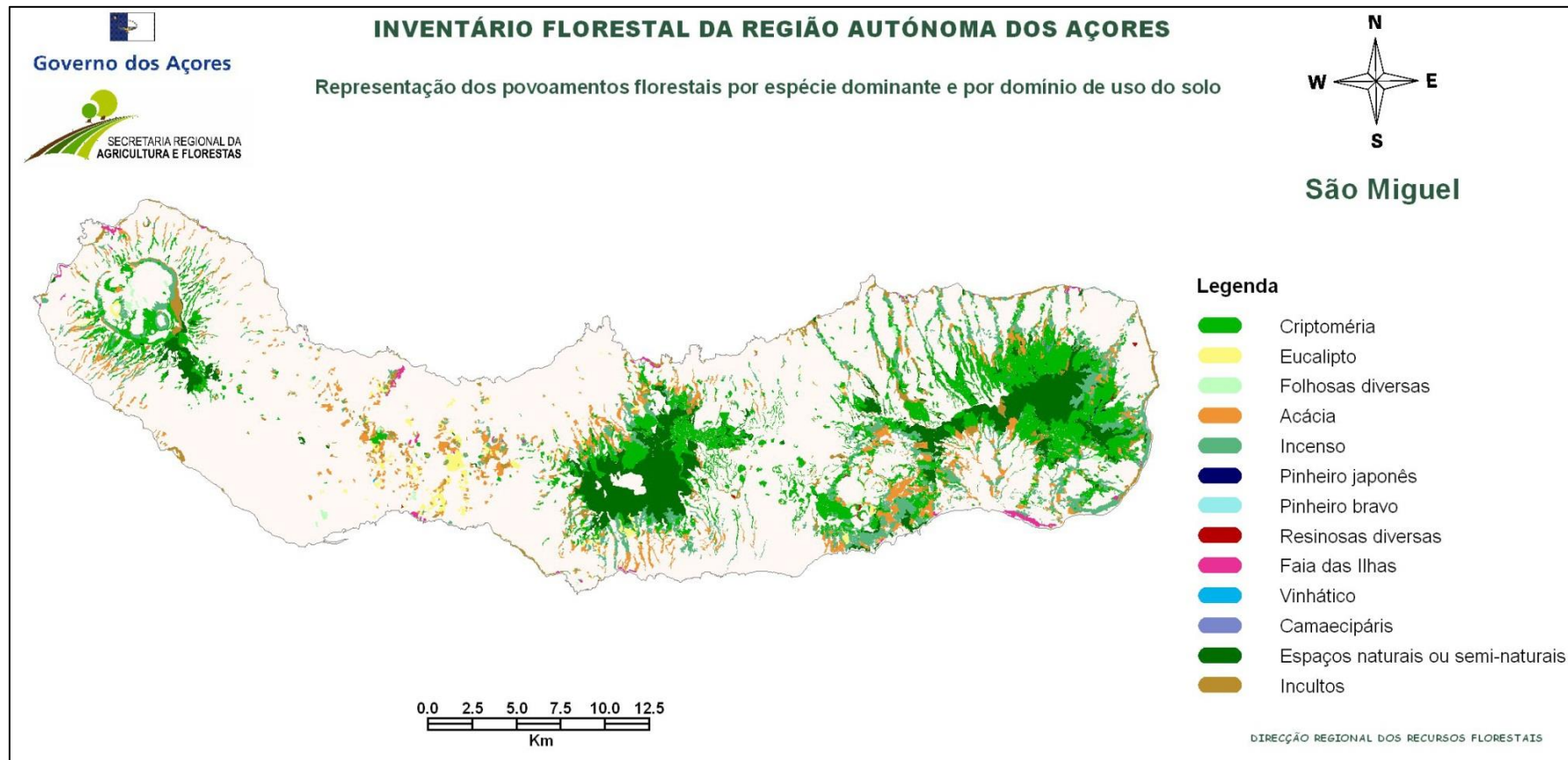


Figura 1 – Representação na ilha de São Miguel dos povoamentos florestais por espécie dominante e por domínio de uso do solo (adaptado de IFRAA, 2007).

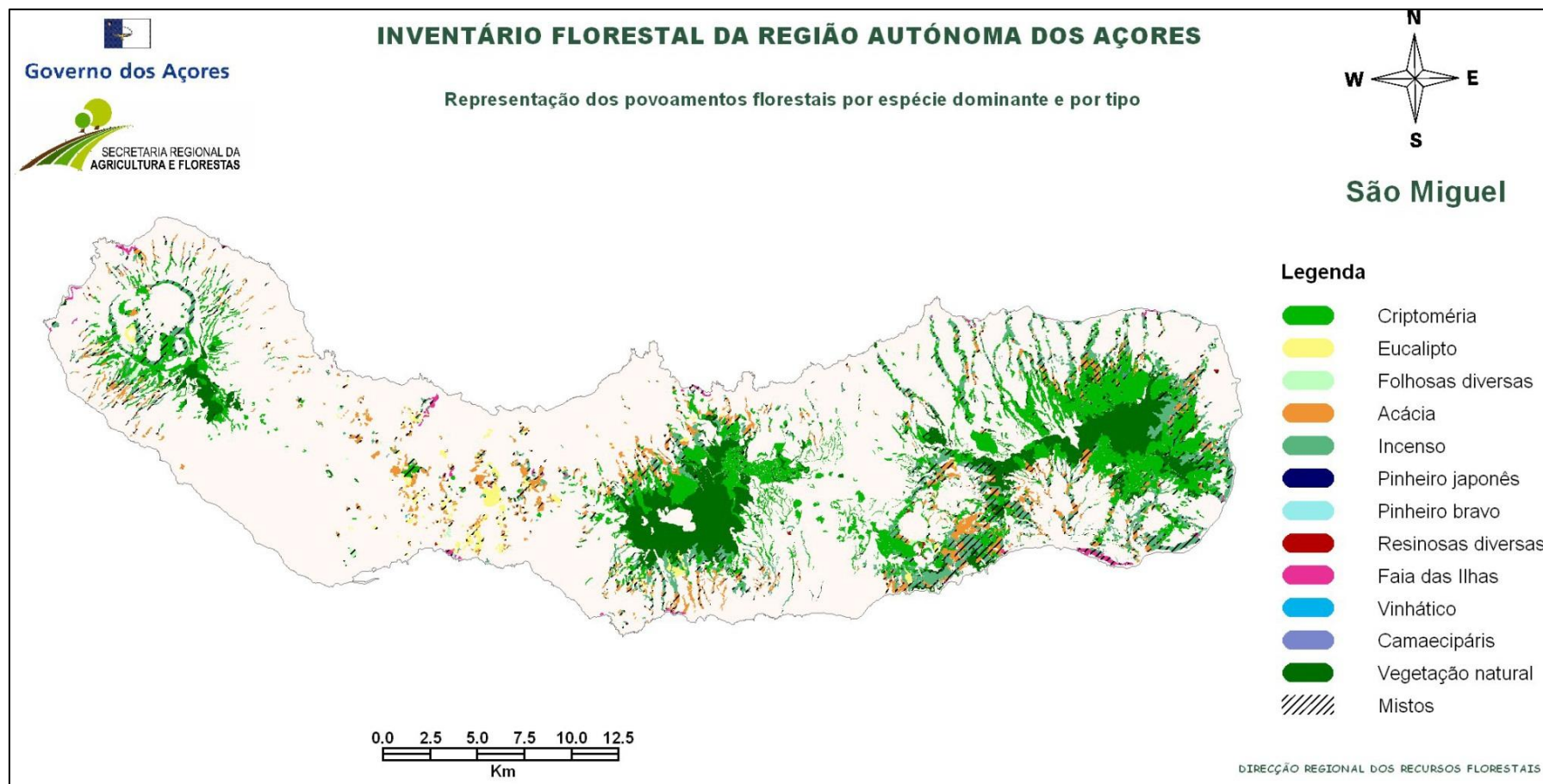


Figura 2 – Representação na ilha de São Miguel dos povoamentos florestais por espécie dominante e por tipo (adaptado de IFRAA, 2007).

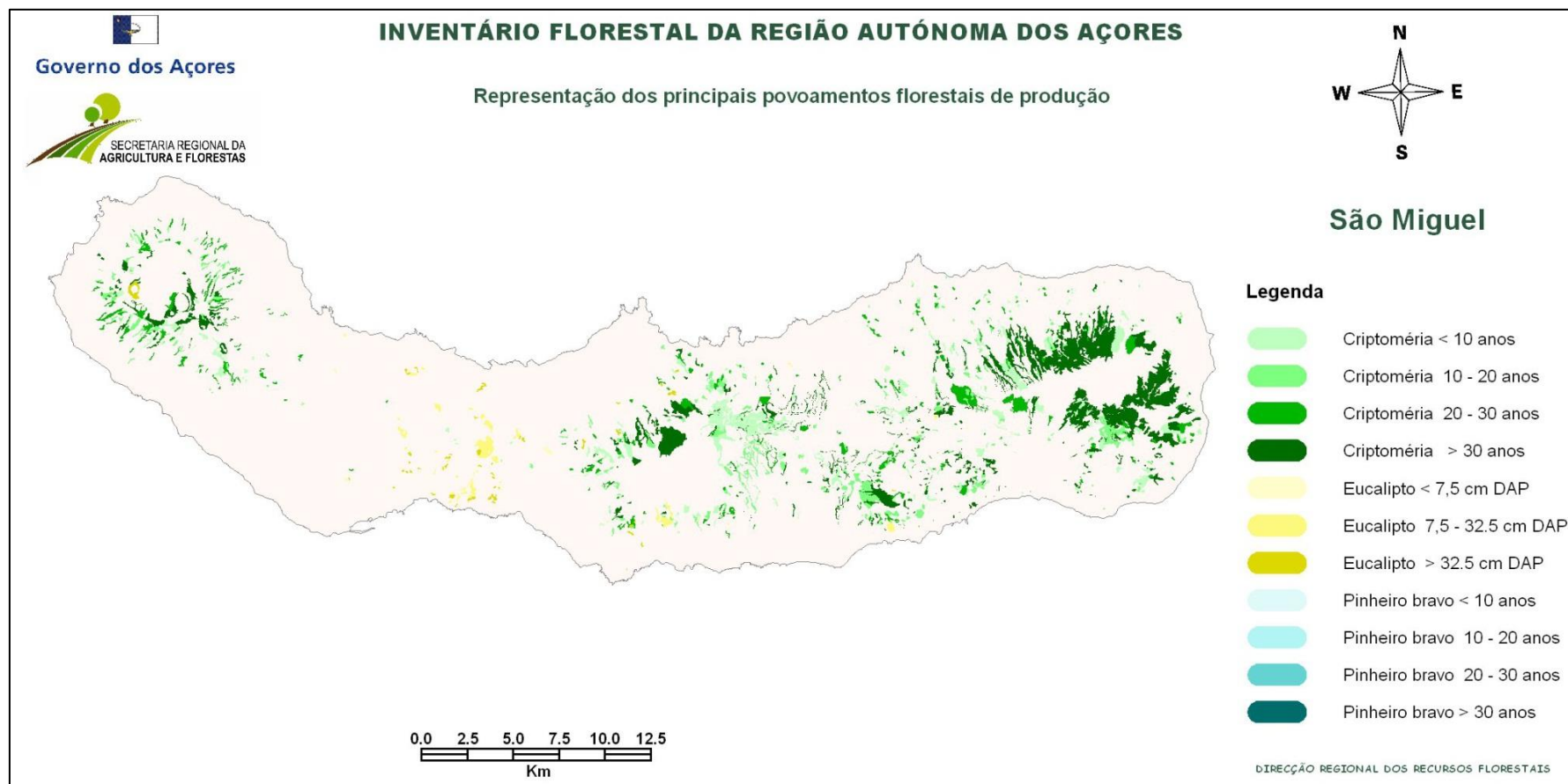


Figura 3 – Representação na ilha de São Miguel dos principais povoamentos florestais de produção (adaptado de IFRAA, 2007).

Espécies dominantes do IFRAA		Corvo	Faial	Flores	Graciosa	Pico	Santa Maria	São Jorge	São Miguel	Terceira	Total
Espaços florestais	Criptoméria	1,6	866,5	547,9	62,9	823,9	203,7	181,3	8123,9	1583,1	12394,8
	Eucalipto	0,0	0,0	3,7	111,8	152,7	156,2	100,1	678,3	2379,0	3581,8
	Folhosas diversas	5,2	239,3	11,4	0,0	5,3	37,4	8,0	233,1	48,0	587,7
	Acácia	0,0	0,0	74,9	9,1	507,7	302,8	324,8	2928,6	174,2	4322,1
	Incenso	28,7	1757,2	1811,6	342,0	11705,1	1172,8	2021,3	3701,4	1347,9	23888,0
	Pinheiro japonês	0,0	0,0	0,0	0,0	116,3	0,4	0,0	8,1	0,0	124,8
	Pinheiro bravo	0,0	4,4	0,0	2,5	0,0	82,7	20,3	2,0	104,3	216,2
	Resinosas diversas	0,0	4,6	0,0	58,6	0,0	0,1	0,0	23,5	19,3	106,1
	Faia das ilhas	0,6	140,9	43,9	0,0	956,2	0,0	1035,2	235,8	29,4	2442,0
	Vinhático	0,0	19,7	0,0	140,1	0,0	0,3	0,0	1,8	0,0	161,9
	<i>Camaecyparis</i>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	14,7	5,6	20,8
	Total dos espaços florestais	36,1	3032,6	2493,4	727,0	14267,2	1956,9	3691,0	15951,2	5690,8	47846,2
Espaços naturais e semi-naturais		13,2	737,9	4456,2	262,7	4241,8	346,7	4200,4	4927,1	3773,6	22959,6
Incultos		3,8	341,3	159,4	24,2	16,5	314,9	75,7	1577,7	691,9	3205,4

Tabela 1 – Áreas de ocupação dos povoamentos por espécie dominante do IFRAA (hectares) (adaptado de IFRAA, 2007).

		Densidade (árvores/ha)	Diâmetro a 1,30m (cm)	Altura (m)	Volume individual (m ³)	Volume total (m ³ /ha)	Acréscimo médio anual (m ³ /ha/ano)	Área basal (m ² /ha)	Altura dominante (m)
Criptoméria 10 – 20 anos	Média	2528	17,8	10,9	0,14	353,85	21,15	63,4	12,6
	Erro (95% confiança)	10%	7%	9%	19%	19%	19%	13%	9%
Criptoméria 20 – 30 anos	Média	2177	23,4	15,7	0,34	668,98	26,04	90,7	18,2
	Erro (95% confiança)	10%	7/	9%	22%	14%	14%	10%	9%
Criptoméria > 30 anos	Média	1811	26,8	18,0	0,51	806,62	22,05	96,7	20,8
	Erro (95% confiança)	10%	9%	6%	23%	14%	14%	11%	6%
Eucalipto 7,5 – 32,5 cm DAP	Média	1104	20,5	17,0	0,31	291,88	-	34,0	22,8
	Erro (95% confiança)	20%	13%	9%	34%	28%	-	20%	11%
Eucalipto > 32,5cm DAP	Média	538	39,7	25,3	1,39	722,50	-	64,8	30,9
	Erro (95% confiança)	28%	26%	21%	38%	12%	-	20%	33%

Tabela 2 – Principais valores médios dendrométricos e erros de amostragem associados, por estrato florestal (adaptado de IFRAA, 2007).

Anexo 2 – Utilização das várias combinações dos valores de coeficiente

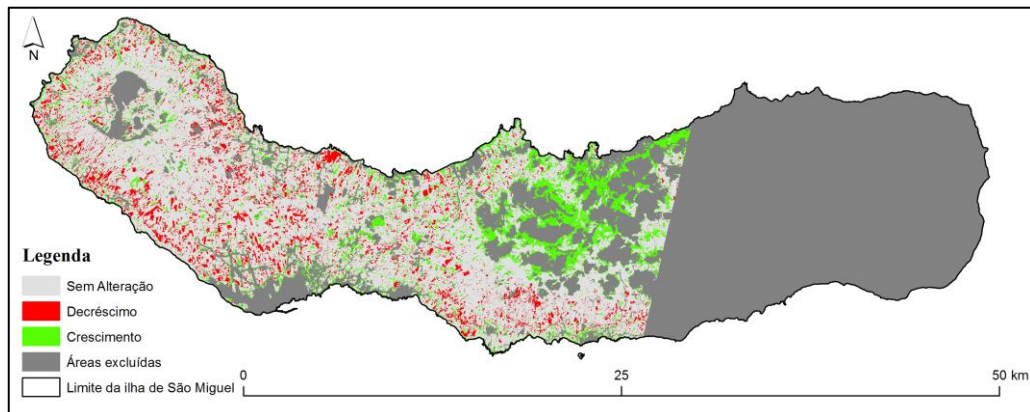


Figura 1 – Aplicação do coeficiente 1 tanto para as áreas de decréscimo como de crescimento de vegetação.

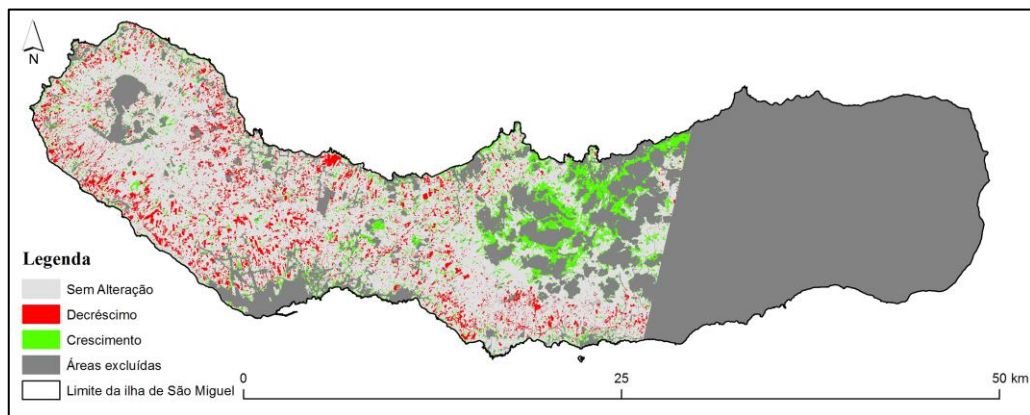


Figura 2 – Aplicação do coeficiente de 1 para áreas de decréscimo e de 1,25 para áreas de crescimento de vegetação.

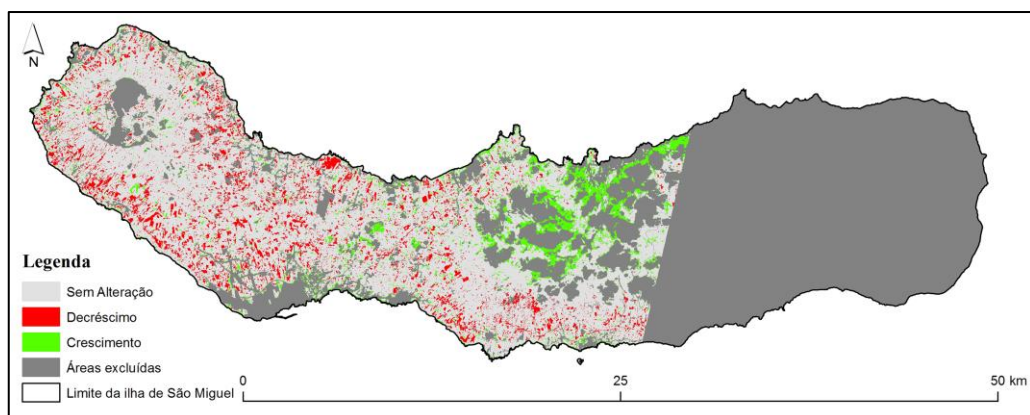


Figura 3 – Aplicação do coeficiente 1 para áreas de decréscimo e 1,50 para áreas de crescimento de vegetação.

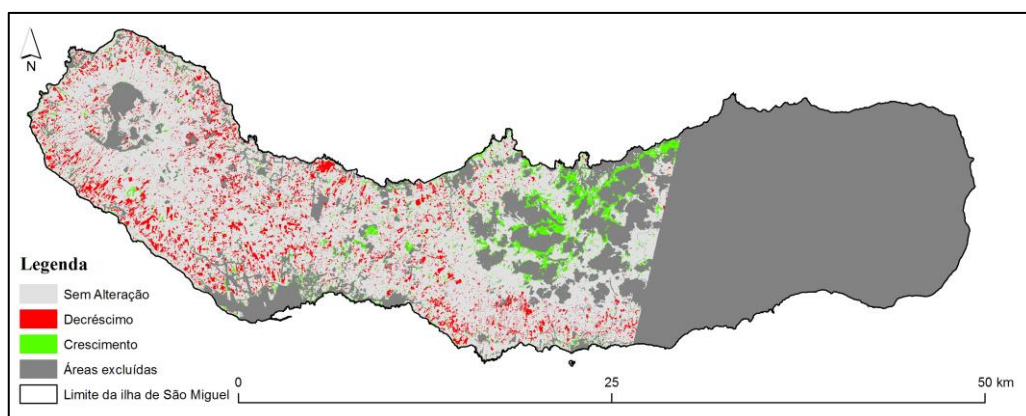


Figura 4 – Aplicação do coeficiente 1 para áreas de decréscimo e 1,75 para áreas de crescimento de vegetação.

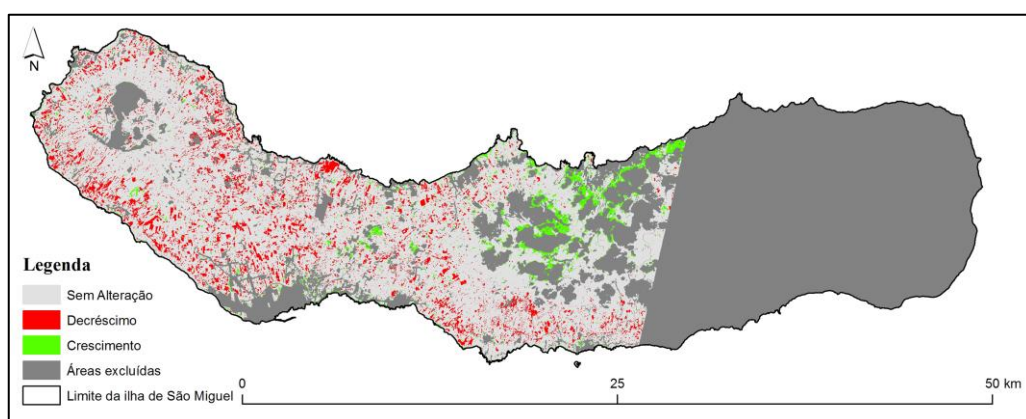


Figura 5 – Aplicação do coeficiente 1 para áreas de decréscimo e 2 para áreas de crescimento de vegetação.

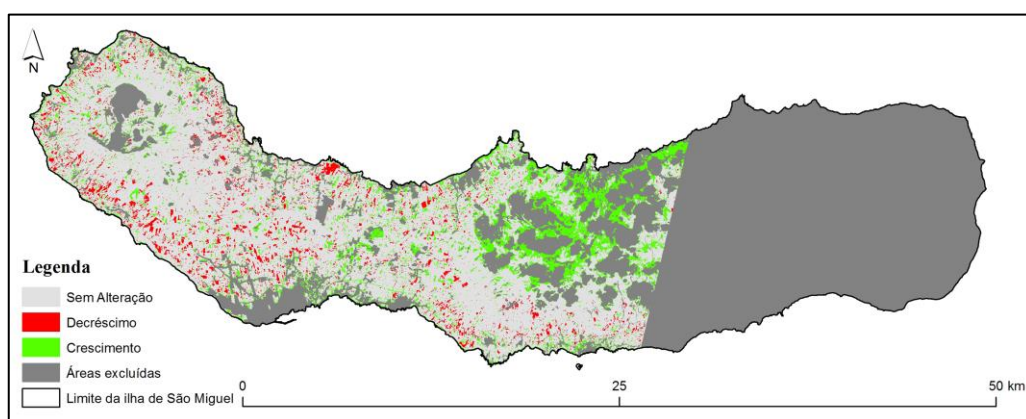


Figura 6 – Aplicação do coeficiente 1,25 para áreas de decréscimo e 1 para áreas de crescimento de vegetação.

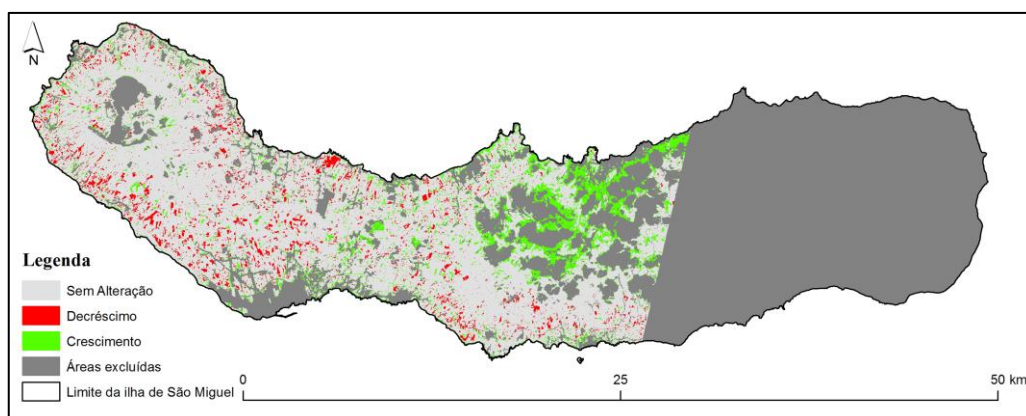


Figura 7 – Aplicação do coeficiente 1,25 tanto para as áreas de decréscimo como de crescimento de vegetação.

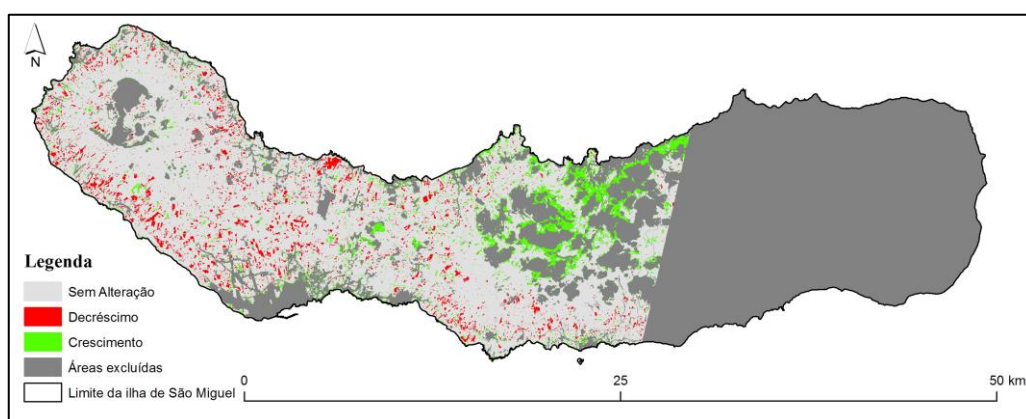


Figura 8 – Aplicação do coeficiente 1,25 para áreas de decréscimo e 1,50 para áreas de crescimento de vegetação.

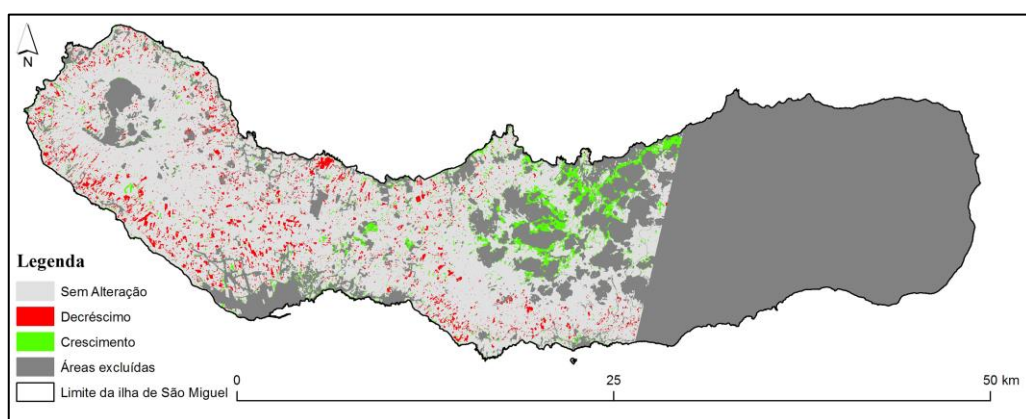


Figura 9 – Aplicação do coeficiente 1,25 para áreas de decréscimo e 1,75 para áreas de crescimento de vegetação.

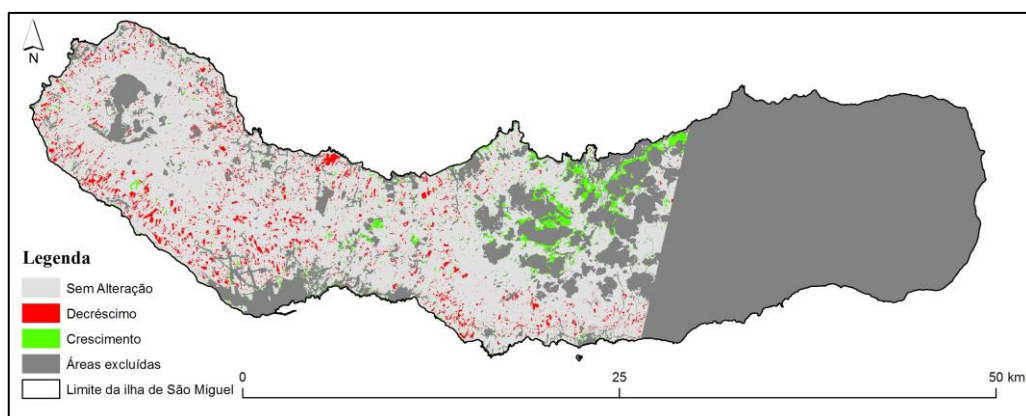


Figura 10 – Aplicação do coeficiente 1,25 para áreas de decréscimo e 2 para áreas de crescimento de vegetação.

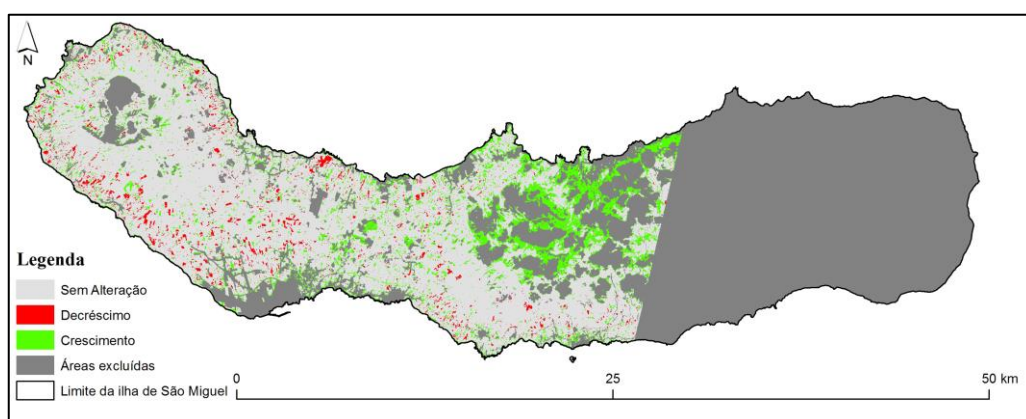


Figura 11 – Aplicação do coeficiente 1,50 para áreas de decréscimo e 1 para áreas de crescimento de vegetação.

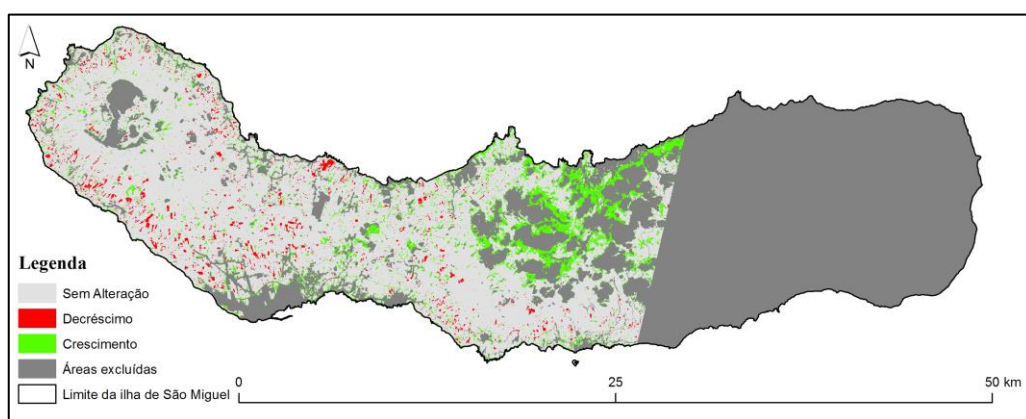


Figura 12 – Aplicação do coeficiente 1,50 para áreas de decréscimo e 1,25 para áreas de crescimento de vegetação.

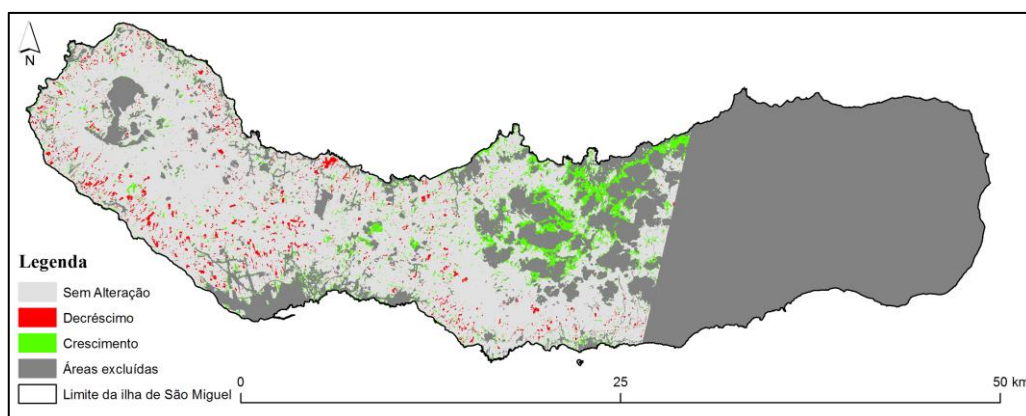


Figura 13 – Aplicação do coeficiente 1,50 tanto para as áreas de decréscimo como de crescimento de vegetação.

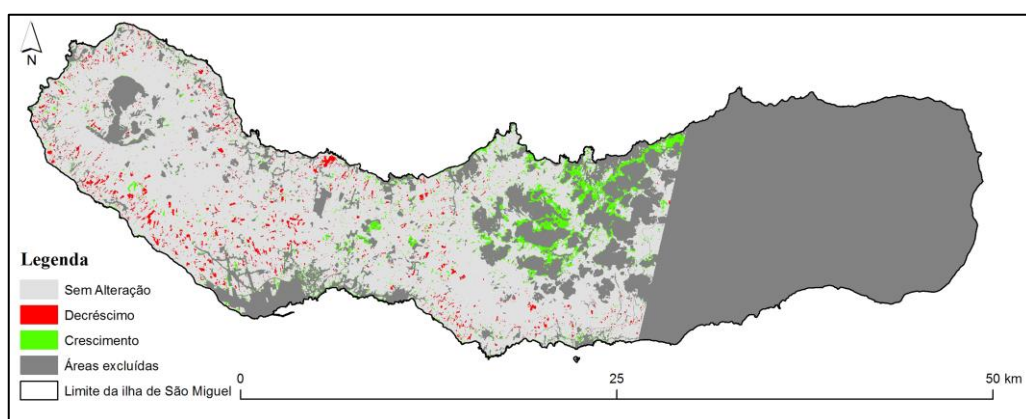


Figura 14 – Aplicação do coeficiente 1,50 para áreas de decréscimo e 1,75 para áreas de crescimento de vegetação.

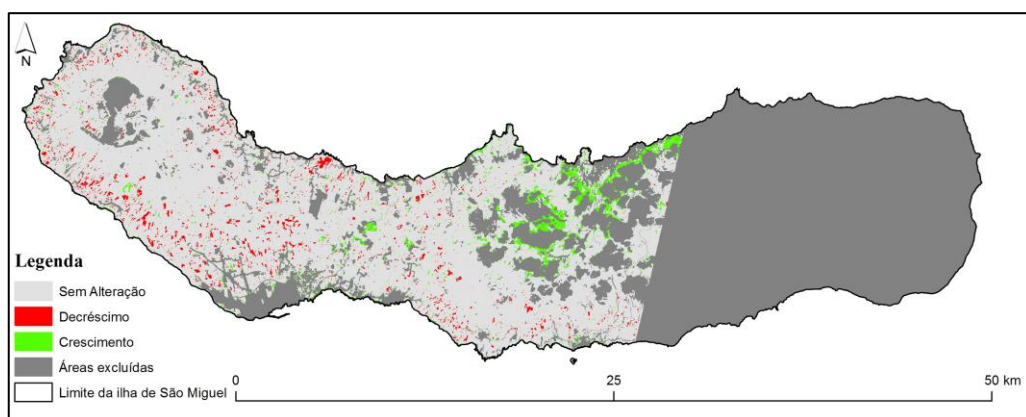


Figura 15 – Aplicação do coeficiente 1,50 para áreas de decréscimo e 2 para áreas de crescimento de vegetação.

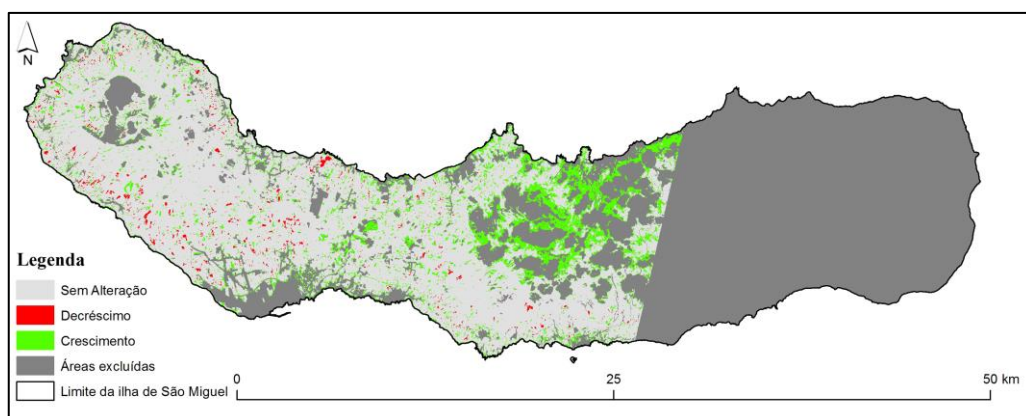


Figura 16 – Aplicação do coeficiente 1,75 para áreas de decréscimo e 1 para áreas de crescimento de vegetação.

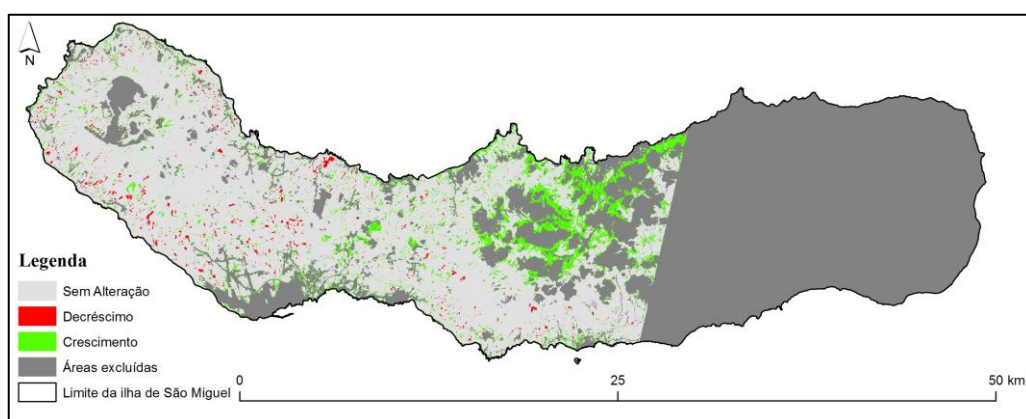


Figura 17 – Aplicação do coeficiente 1,75 para áreas de decréscimo e 1,25 para áreas de crescimento de vegetação.

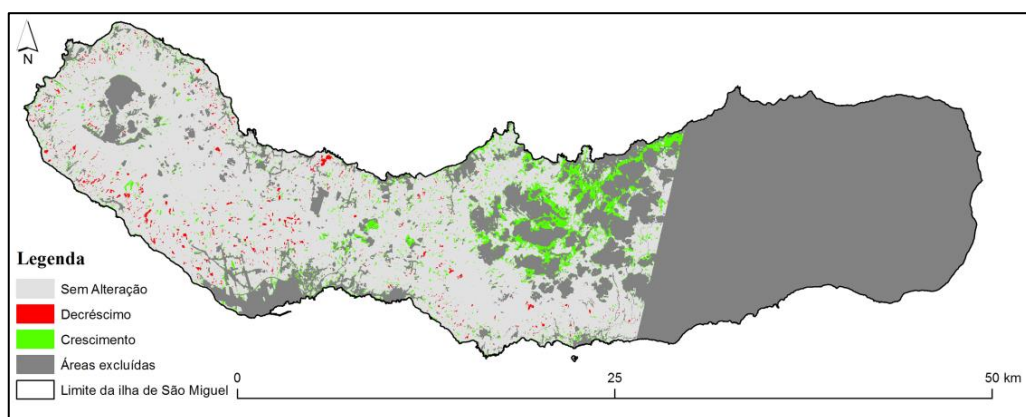


Figura 18 – Aplicação do coeficiente 1,75 para áreas de decréscimo e 1,50 para áreas de crescimento de vegetação.

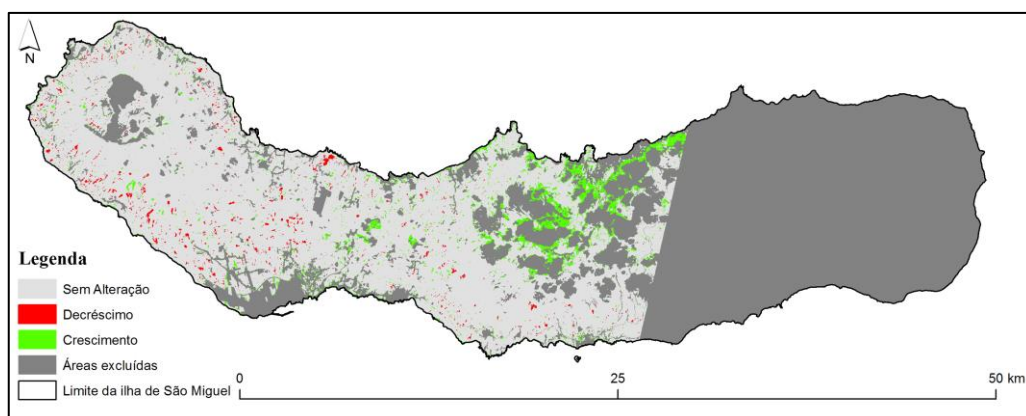


Figura 19 – Aplicação do coeficiente 1,75 tanto para as áreas de decréscimo como de crescimento de vegetação.

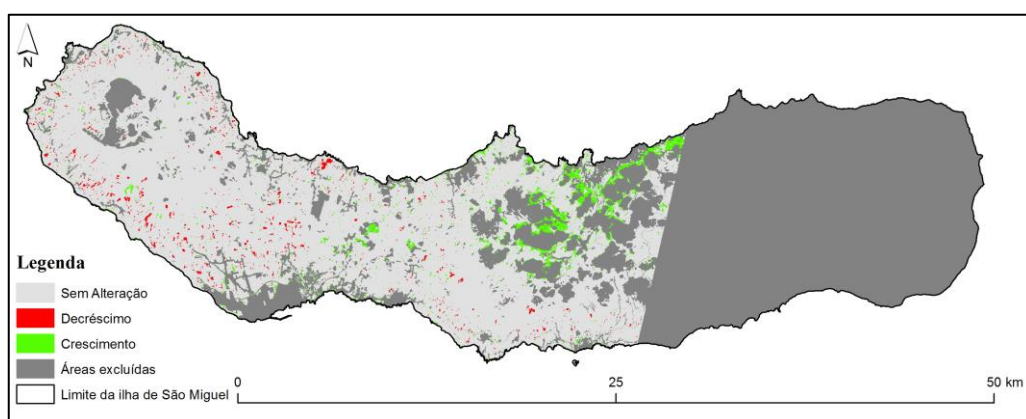


Figura 20 – Aplicação do coeficiente 1,75 para áreas de decréscimo e 2 para áreas de crescimento de vegetação.

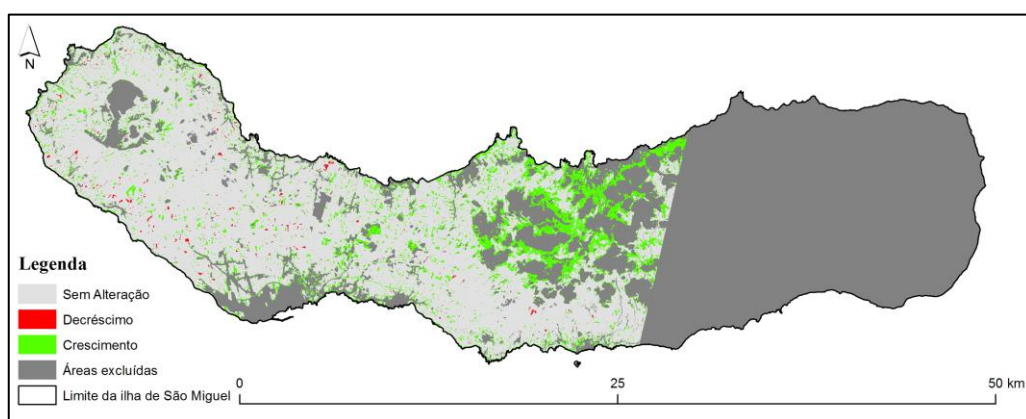


Figura 21 – Aplicação do coeficiente 2 para áreas de decréscimo e 1 para áreas de crescimento de vegetação.

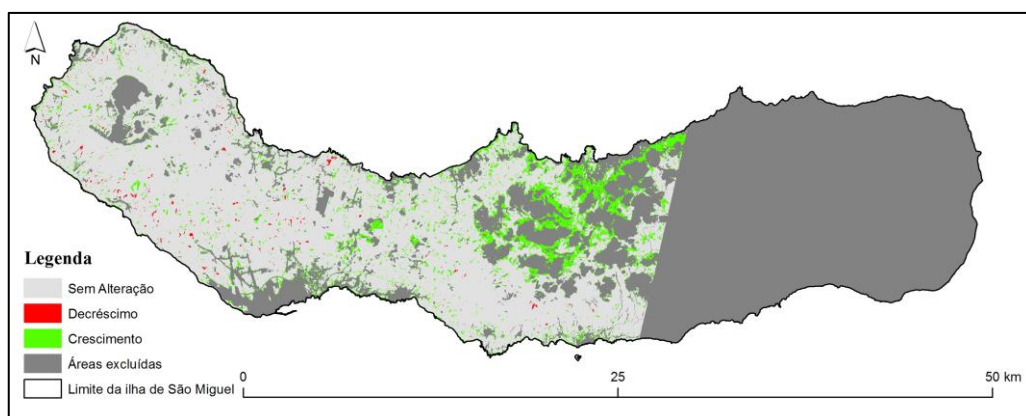


Figura 22 – Aplicação do coeficiente 2 para áreas de decréscimo e 1,25 para áreas de crescimento de vegetação.

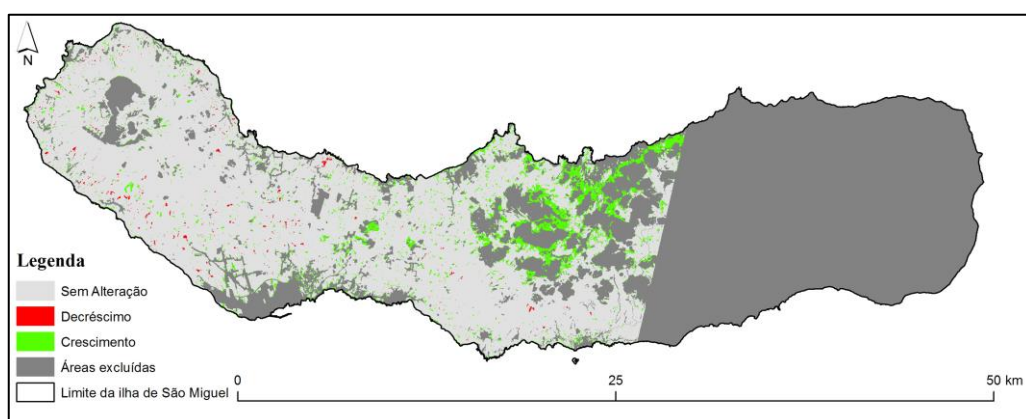


Figura 23 – Aplicação do coeficiente 2 para áreas de decréscimo e 1,50 para áreas de crescimento de vegetação.

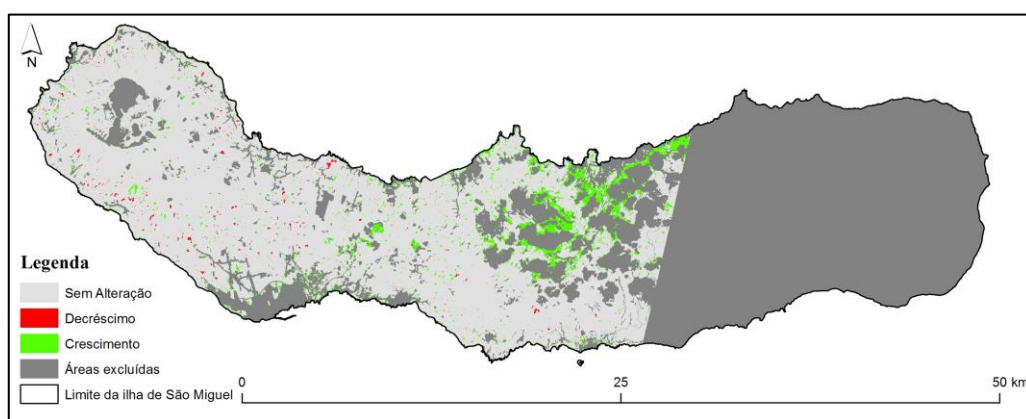


Figura 24 – Aplicação do coeficiente 2 para áreas de decréscimo e 1,75 para áreas de crescimento de vegetação.

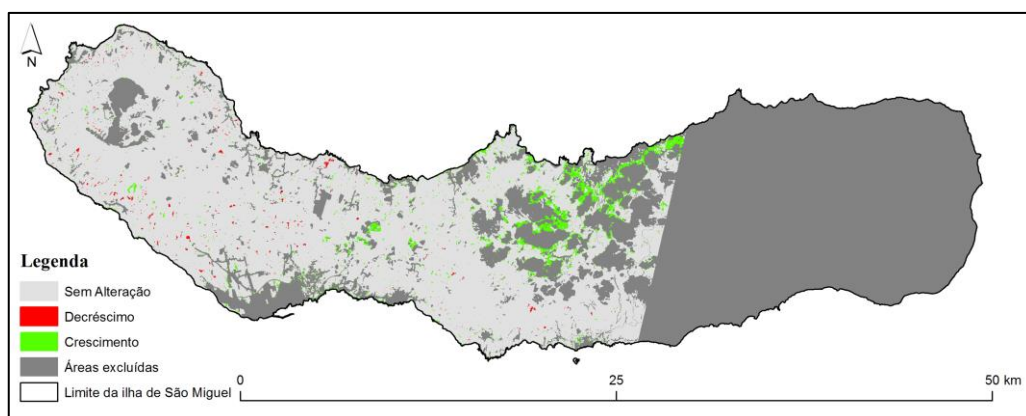


Figura 25 – Aplicação do coeficiente 2 tanto para as áreas de decréscimo como de crescimento de vegetação.

